Récents développements en lidar fibré

Ecole d'été lidar

Juin 2013

Claudine Besson, Agnès Dolfi-Bouteyre

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

retour sur innovation

Plan

- Développements de sources fibrées à grande brillance spectrale
  - l'amplification fibrée: technologie
  - Comment monter en puissance ? Contrôle du seuil Brillouin
  - Application au dial spatial
  - Comment monter en puissance? Combinaison cohérente
  - Application au lidar vent

- Exploitation des non-linéarités des fibres dopées
  - Les sources à 2 µm
  - Génération de supercontinuum
  - Application à la détection de gaz

- La vibrométrie laser:
  - Principe et traitement de signal
  - Le hardware
  - Application au diagnostique sismique

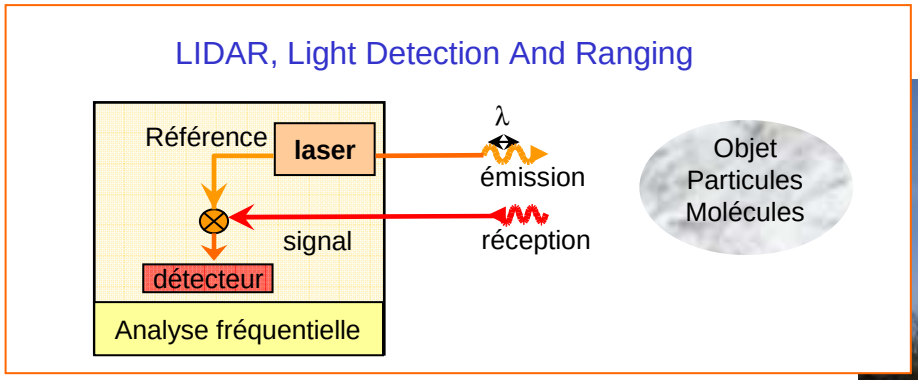
Plan

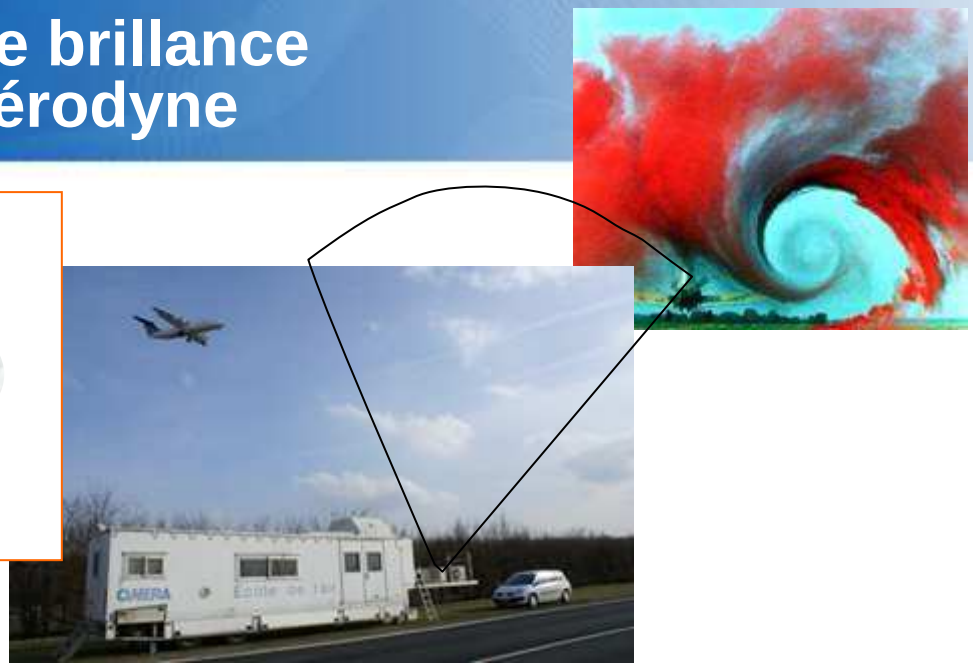
- Développements de sources fibrées à grande brillance spectrale
  - l'amplification fibrée: technologie
  - Comment monter en puissance ? Contrôle du seuil Brillouin
  - Application au dial spatial
  - Comment monter en puissance? Combinaison cohérente
  - Application au lidar vent

- Exploitation des non-linéarités des fibres dopées
  - Les sources à 2 µm
  - Génération de supercontinuum
  - Application à la détection de gaz

- La vibrométrie laser:
  - Principe et traitement de signal
  - Le hardware
  - Application au diagnostique sismique

Besoin en source à grande brillance spectrale pour le lidar hétérodyne

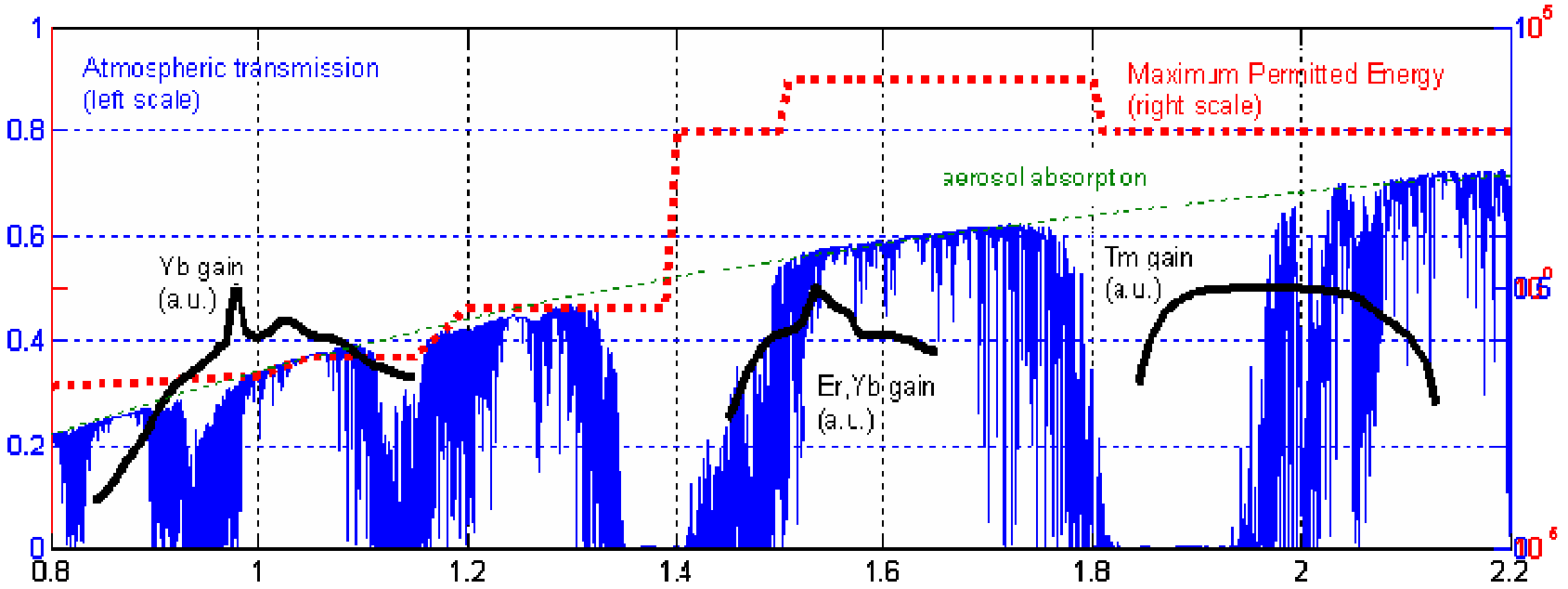




- Spécifications:
  - Longueur d'onde à sécurité oculaire (1,5µm)
  - Bonne qualité de faisceau : monomode
  - Spectre fin pour l'analyse cohérente: mono fréquence
  - Haute énergie (~1000 µJ), haute puissance crête (1kW)

- La technologie fibrée possède des avantages:
  - Composants issus des développements du secteur des télécommunications
  - Robustesse (tests lidar en vol dès 2003, DALHEC)

Intérêt des lasers fibrés

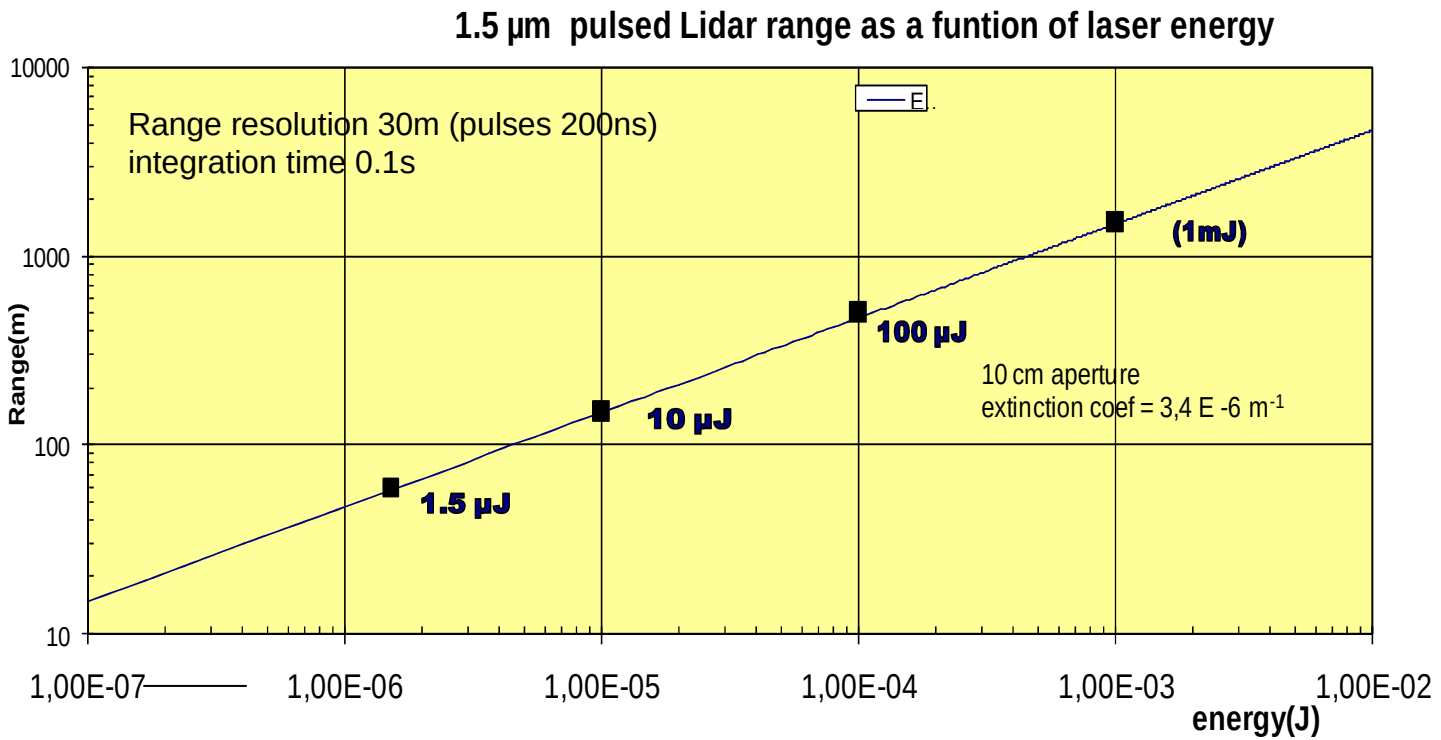


Intérêt des lasers fibrés

	Points positifs	Points critiques
Portées élevées (jusqu'à quelques dizaines de km)	Bonne qualité de faisceau même à P_{MOY} élevée (dissipation thermique efficace)	P_{CRETE} très limitée nécessitant des strctures spéciales
Compacité et applications embarquées sur porteur avion ou satellite	Bon rendement (80% Yb; 30-50% Er:Yb) Résistance aux vibrations	Etendue géométrique limitée pour coupler la pompe. Dopage Er:Yb délicat en raison de la présence de P (indice élevé)
Formes complexes (modulation d'amplitude ou de phase, agilité…)	Intégration monolithique des fonctions ("tout fibré")	
Agilité spectrale (accordabilité en λ, finesse de raie)	Grâce à l'architecture oscillateur maître amplifié (MOPFA)	

Motivation: Evolution de la portée du lidar impulsionnel (e.g. cartographie du vent)

Facteur de qualité du lidar Doppler: $$Q = \frac{E.\sqrt{PRF}}{1+\left(M^2\right)^2}$$



A.Dolfi-Bouteyre, G.Canat, M.Valla, B.Augère, C.Besson, D.Goular, L.Lombard, J.P.Cariou, A.Durecu, D.Fleury, S.Broumiche, S.Lugan, B.Macq: "*Pulsed 1.5 micron lidar for axial aircraft wake vortex detection based on high brightness large core fiber amplifier* – J. Select. Tops. 15, P. 441 (2009)

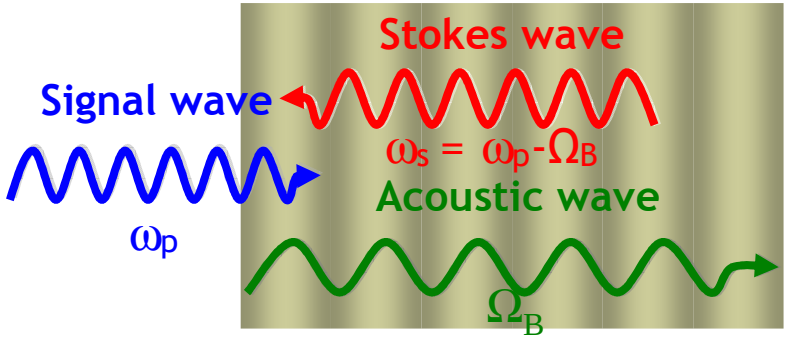
Plan

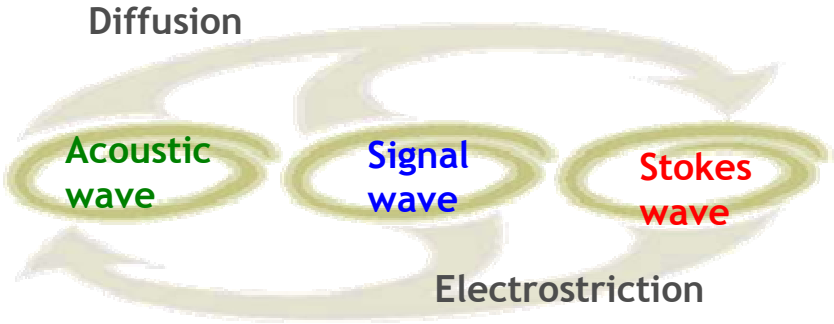
- Développements de sources fibrées à grande brillance spectrale
  - l'amplification fibrée: technologie
  - Comment monter en puissance ? Contrôle du seuil Brillouin
  - Application au dial spatial
  - Comment monter en puissance? Combinaison cohérente
  - Application au lidar vent

- Exploitation des non-linéarités des fibres dopées
  - Les sources à 2 µm
  - Génération de supercontinuum
  - Application à la détection de gaz

- La vibrométrie laser:
  - Principe et traitement de signal
  - Le hardware
  - Application au diagnostique sismique

MAIS Diffusion Brillouin Stimulée dans les fibres optiques

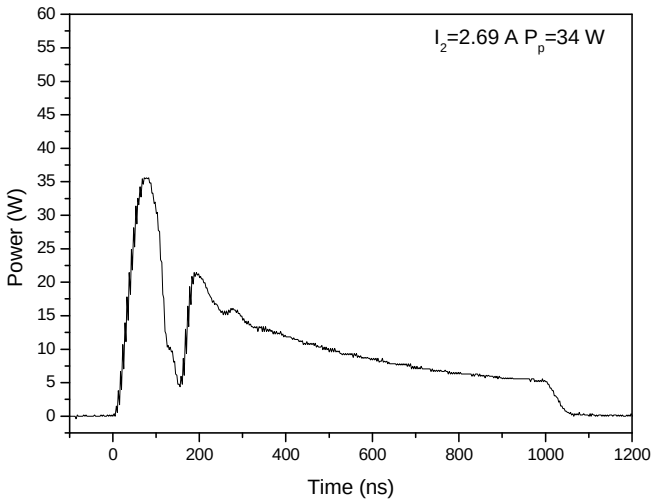




$$I = \frac{P}{A_{eff}} \quad \text{élevée}$$

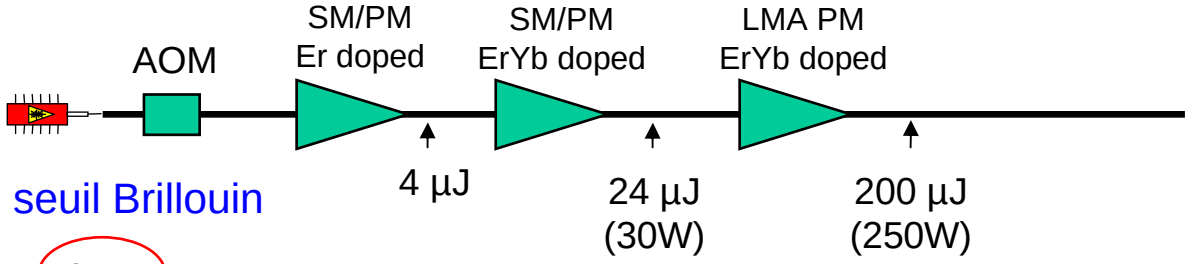
$$P_{seuil} \approx 21 \frac{A_{eff}}{g_B L_{eff}}$$

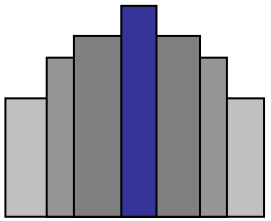
Modélisation de l'effet Brillouin dans les fibres: Évolution de la forme d'impulsion au fur et à mesure que la puissance crête croît



Sources à grande brillance spectrale

Développement de chaînes MOPA fibrées = sources pour les applications LIDAR





Profil d'indice
Fibre à piédestal

Contrôle du seuil Brillouin

$$P_{seuil} \approx 21 \frac{A_{eff}}{g_B L_{eff}}$$

Faible ON
→Monomode
→Faible ASE

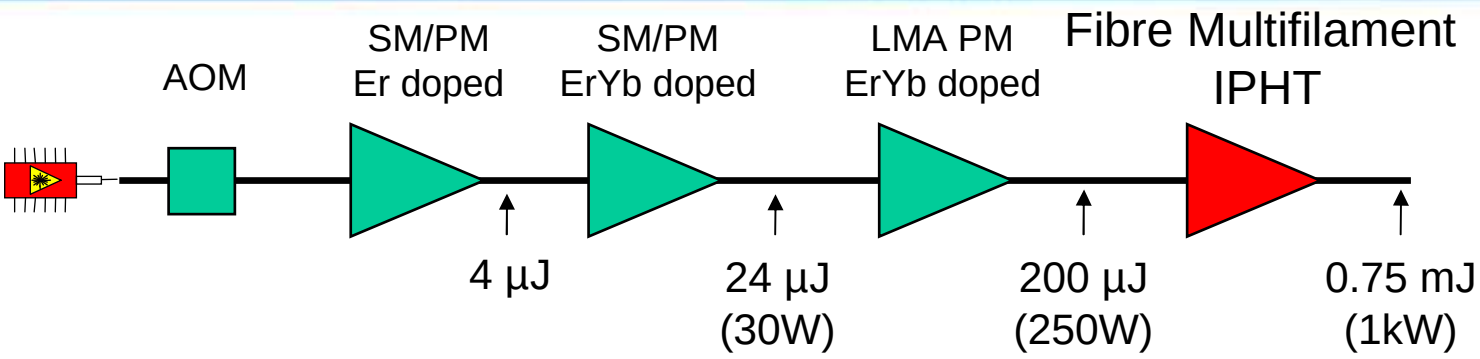
Energie:	**100 µJ**
Durée d'impulsion:	**800 ns**
PRF:	**12 kHz**

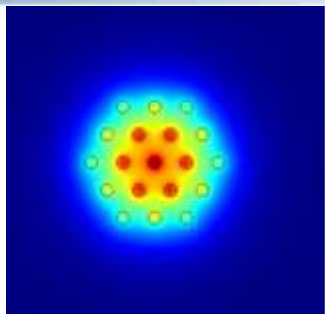
Version « MELMEC 200 »
Produit Keopsys 2009

Sources CREDOS, FIDELIO, Windcube 200S

M.Valla *« Etude d'un lidar Doppler impulsionnel à laser Erbium fibré pour des mesures de champ de vent dans la couche limite de l'atmosphère »*, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications (2005)

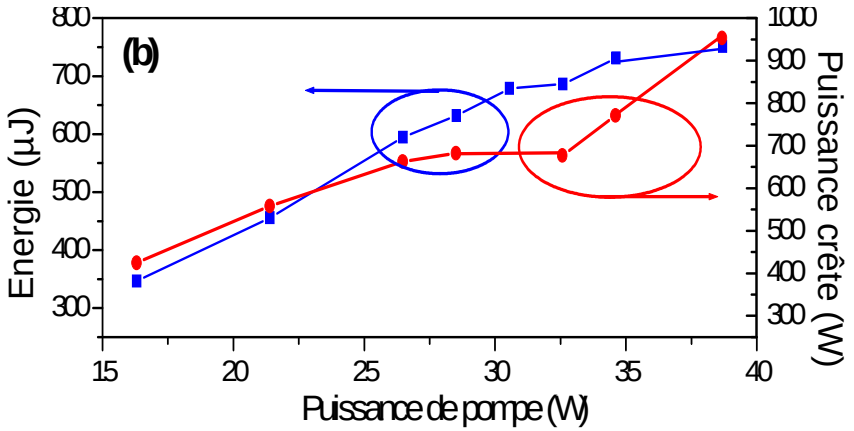
Sources à grande brillance spectrale: résultats avec fibres « multifilament »





Fibre multifilament

$$P_{seuil} \approx 21 \frac{A_{eff}}{g_B L_{eff}}$$



Résultats

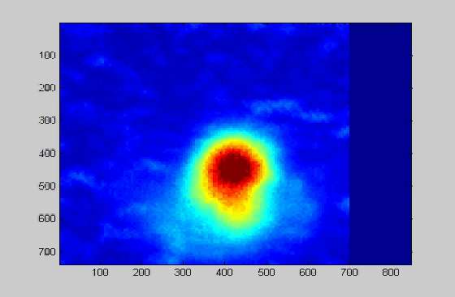
- Haute stabilité
- M^2=1.3
- Puissance crête record (1kW)

G. Canat, S. Jetschke, S. Unger, L. Lombard, P. Bourdon, J. Kirchhof, V. Jolivet, A. Dolfi, and O. Vasseur, "Multifilament-core fibers for high energy pulse amplification at 1.5 µm with excellent beam quality," Opt. Lett. 33, 2701-2703 (2008)

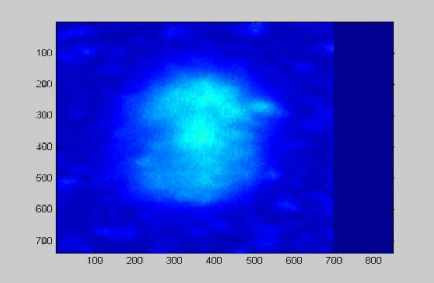
Des soudures spéciales pour obtenir la qualité spatiale

Montage d'un banc de caractérisation spatiale par balayage en longueur d'onde

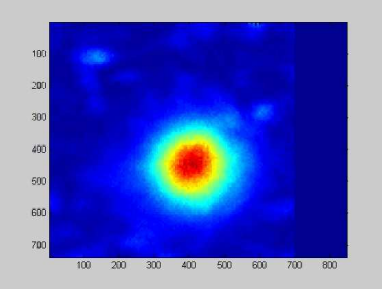
Fibre passive commerciale 25µm



Procédé 1: procédé standard

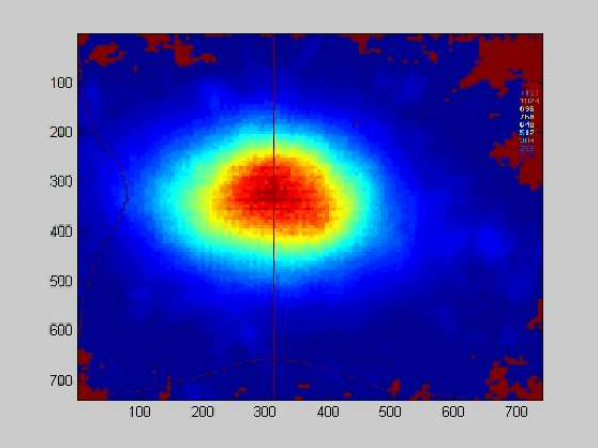


Procédé 2: fibre intermédiaire

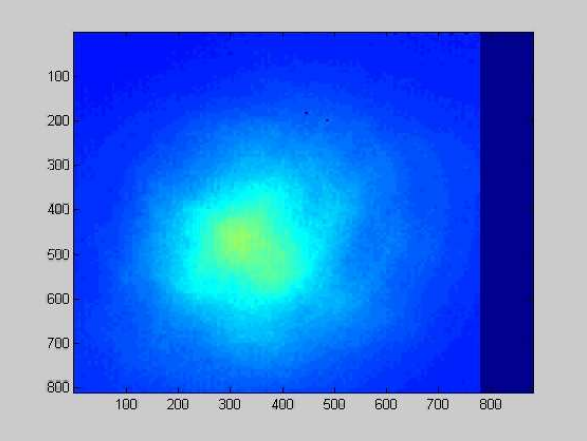


Procédé 3: Vytran (SOLAIRE)

Fibre large cœur commerciale 40µm

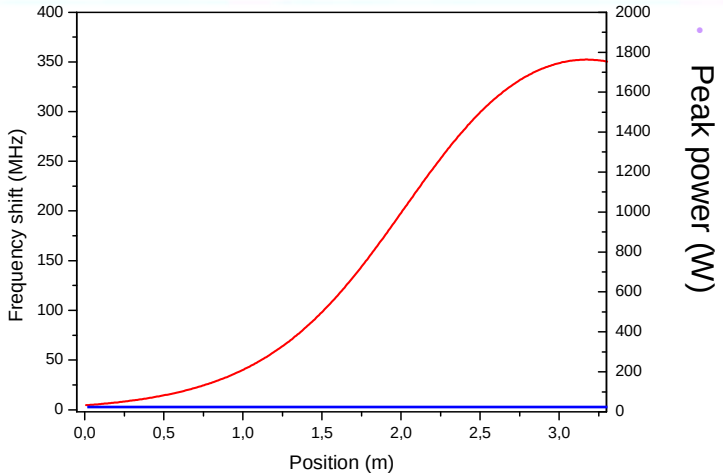


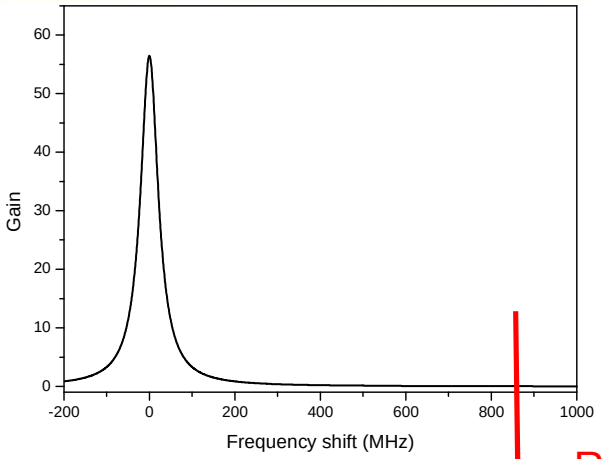
Procédé 1: procédé standard



Procédé 3: Vytran (SOLAIRE)

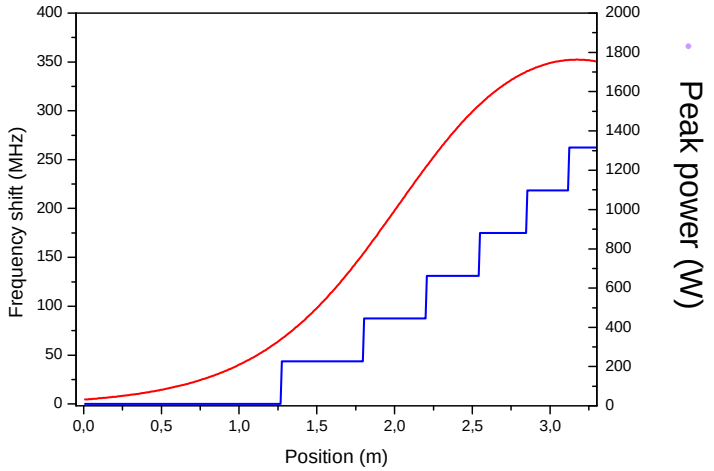
Use of a strain distribution

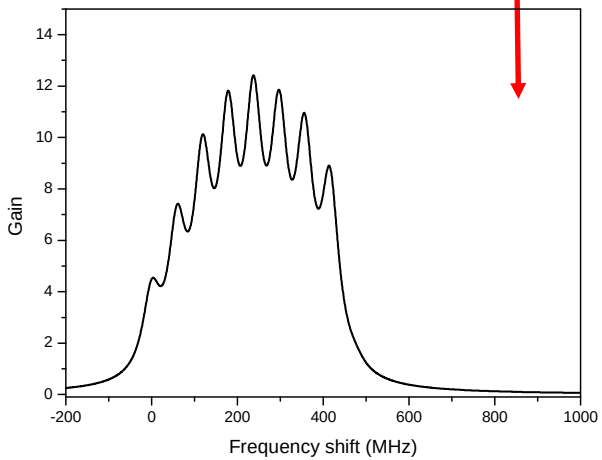




Reduced by 4 to 5

Reduce L_{eff} by splitting the fiber in segments of different Brillouin shifts.





Strain distribution technique for MOFPA peak power increase (2/2)

Increase in peak power by control of the Brillouin threshold

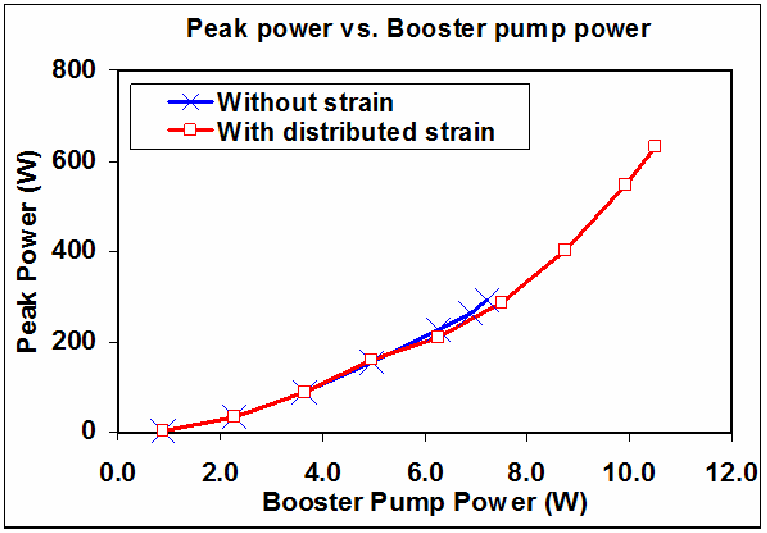
$$P_{seuil} \approx 21 \frac{A_{eff}}{g_B L_{eff}}$$

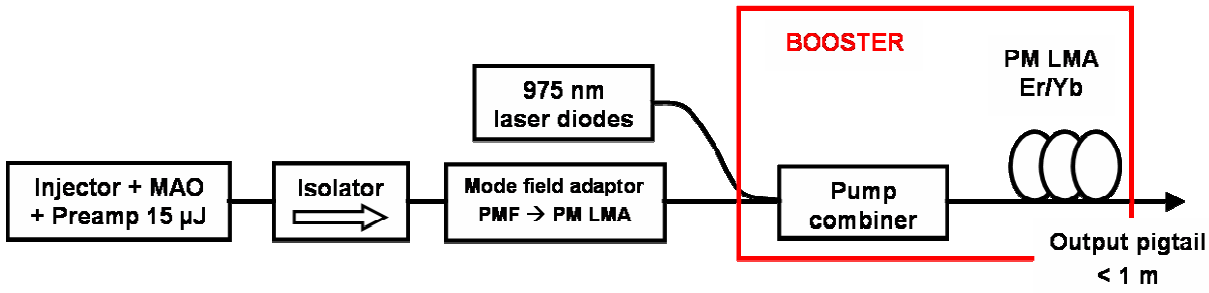
3 stages MOPFA:

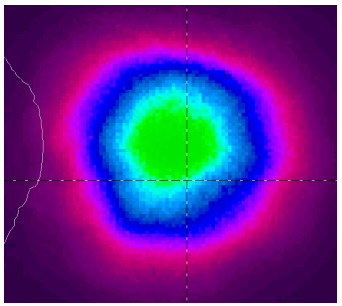
two first stages : commercial 15 µJ fiber laser.

third stage : polarization maintaining large mode area (LMA) Er/Yb fiber with SBS mitigation strategy.

current achievement : 3.5 W average power, 10 kHz, 600 W peak power







Strain distribution technique for MOFPA peak power increase

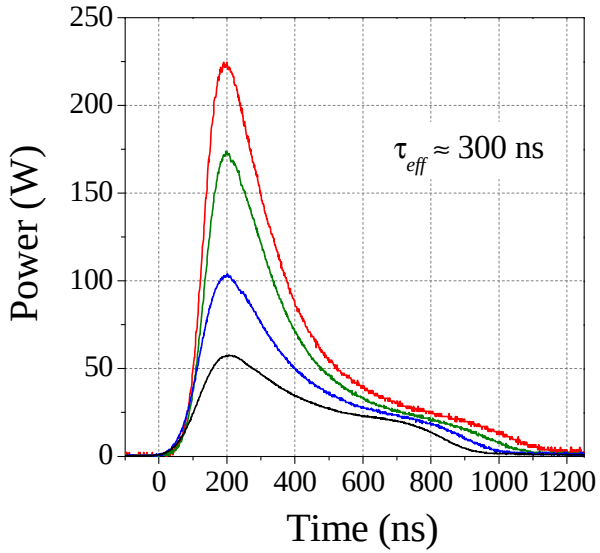
Increase of the extractable peak power :
by increasing the SBS threshold with a
distributed strain on the fiber

Applicable to various laser architectures designs

- **Results:**

Fiber	P_{pic} without	P_{pic} with	Gain
ErYb 7	28 W	186 W	8 dB
ErYb 12 L1	**58 W**	**223 W**	**6 dB**
ErYb 12 L2	106 W	420 W	6 dB
ErYb 25	**300 W**	**600 W**	**3 dB**

with τ_{pulse}~1µs, **E_p~0.6mJ**



- **Conclusion :**

with standard (SM) ErYb fibre : P_{pic} ≈ 400W, +3dB / best commercialy available sources

With large core ErYb fibre : P_{pic} ≈ 600W, +5dB / best commercialy available sources

Plan

- Développements de sources fibrées à grande brillance spectrale
  - l'amplification fibrée: technologie
  - Comment monter en puissance ? Contrôle du seuil Brillouin
  - Application au dial spatial
  - Comment monter en puissance? Combinaison cohérente
  - Application au lidar vent

- Exploitation des non-linéarités des fibres dopées
  - Les sources à 2 µm
  - Génération de supercontinuum
  - Application à la détection de gaz

- La vibrométrie laser:
  - Principe et traitement de signal
  - Le hardware
  - Application au diagnostique sismique

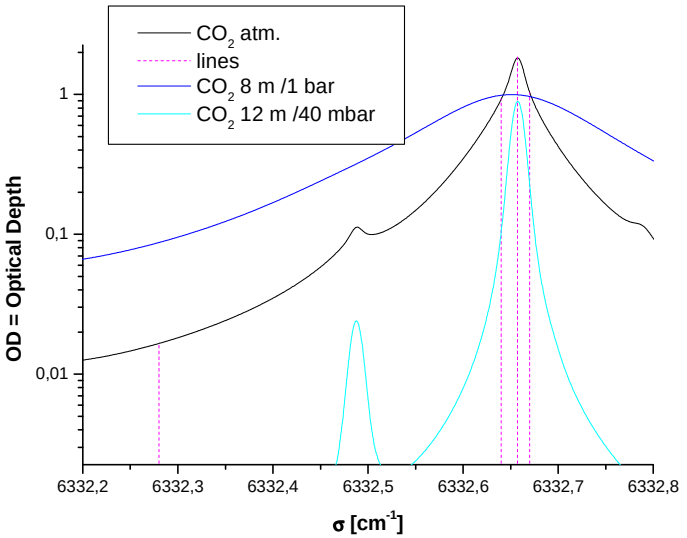
Fiber laser technology demonstration for space applications (projet ESA)

Objective: fiber technology performance assessment for CO2 quantification from space

Fiber laser Breadboard requirements for DIAL lidar

- High frequency stability laser diode seed lasers
- High energy amplification in fiber amplifiers
- Radiation induced attenuation mitigation

Fiber laser characteristics:
Operating wavelengths 1579.11nm / 1579.21nm
Pulse energy 500 µJ
Pulse duration 150 ns
PRF 4 kHz
M^2<2.5
Spectral stability (10s) < 200 kHz
Pulse linewidth < 60 MHz



Laser line center: 6332.6577 cm-1=1579.116 nm
νON1= +0.698 GHz
νON2= -0.502 GHz
νOFF= -11. GHz

Choix des raies d'émission

objectifs: sur le rapport de mélange en air sec de CO2:

Erreur aléatoire (colonne totale*): ARE<0.5 ppm

Erreur aléatoire (PBL): ARE<4.35 ppm

Erreur systématique relative: RSE<0.013%

*Assuming constant Weighting Function w.r.t. Pressure

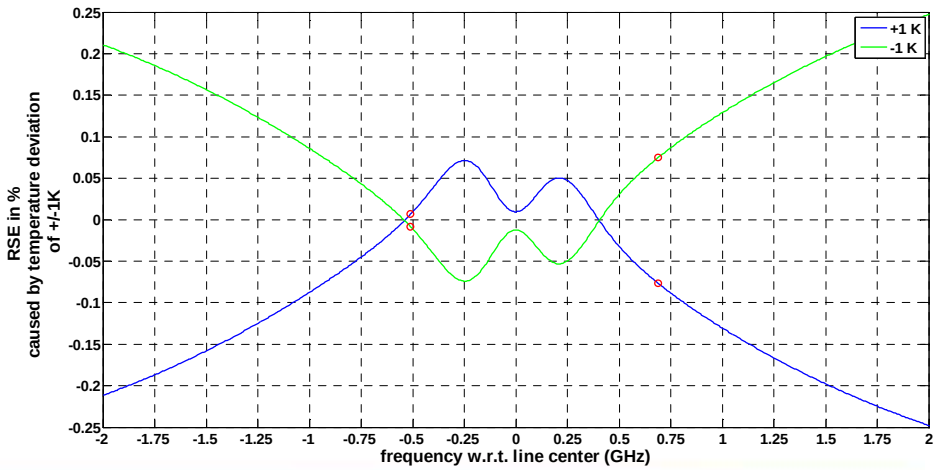
Le lidar mesure une épaisseur optique →Il faut connaître les profils de raie d'absorption, de pression, de température, d'humidité, l'altitude du sol avec précision.
En choisissant bien les raies laser, il est possible de minimiser les erreurs dues à une méconnaissance de ces paramètres:

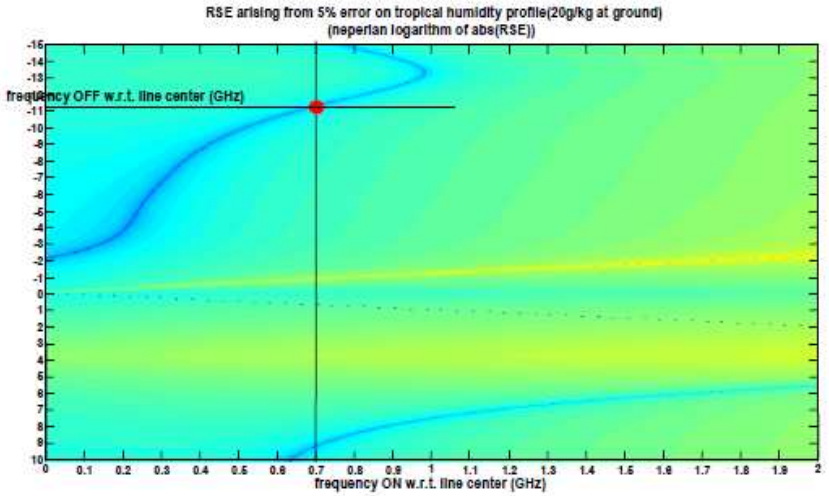
Centre de raie laser: 6332.6577 cm-1=1579.116 nm

νON1= +0.698 GHz (νON2 νOFF) minimise RSE provenant de l'incertitude sur le profil de T

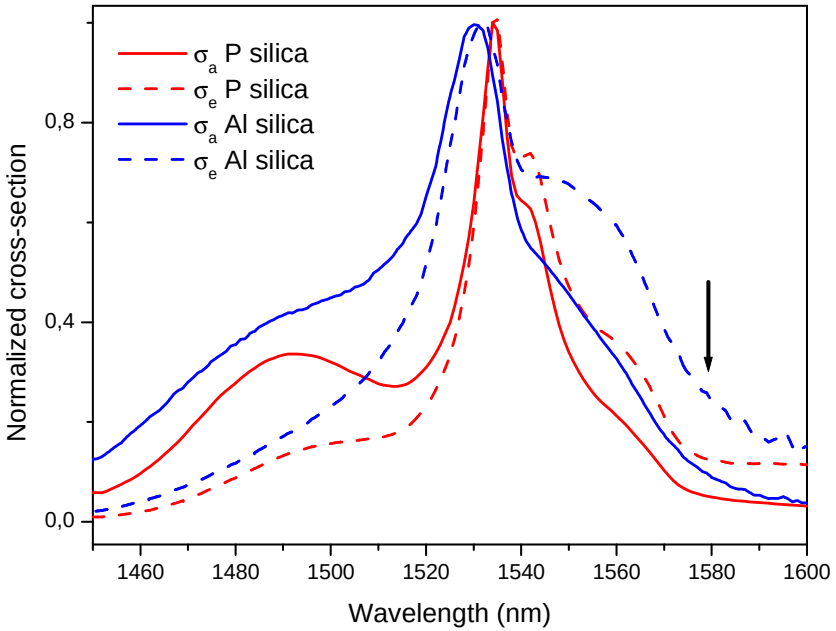
νON2= -0.502 GHz

νOFF= -11. GHz ((νON1 νOFF) minimise RSE provenant de l'incertitude sur le profil de vapeur d'eau





La bande L n'est pas favorable à l'extraction d'énergie dans une fibre dopée Er



Peut-on
- avoir un diamètre de mode de 40µm
- gagner un facteur 2 sur la seuil Brillouin en jouant sur la fibre
- préserver une qualité spatiale correcte
- être efficace à 1580nm
- être peu sensible aux radiations (10 kRad) ⟶ Tests de nouvelles compositions pour réduire les pertes induites par radiations (RIA), augmenter le seuil Brillouin

avec la même fibre ?

Expression du gain G à la longueur d'onde signal:

$$\ln G = gL = \rho\left(\sigma_a + \sigma_e\right)\left(\bar{n}_2 - n^*\right)\Gamma L$$

σ_a / σ_e absorption/emission cross-sections

Γ<1 overlap factor

$\bar{n}_2$ averaged normalized population over L limited by gain saturation from ASE at shorter wavelength

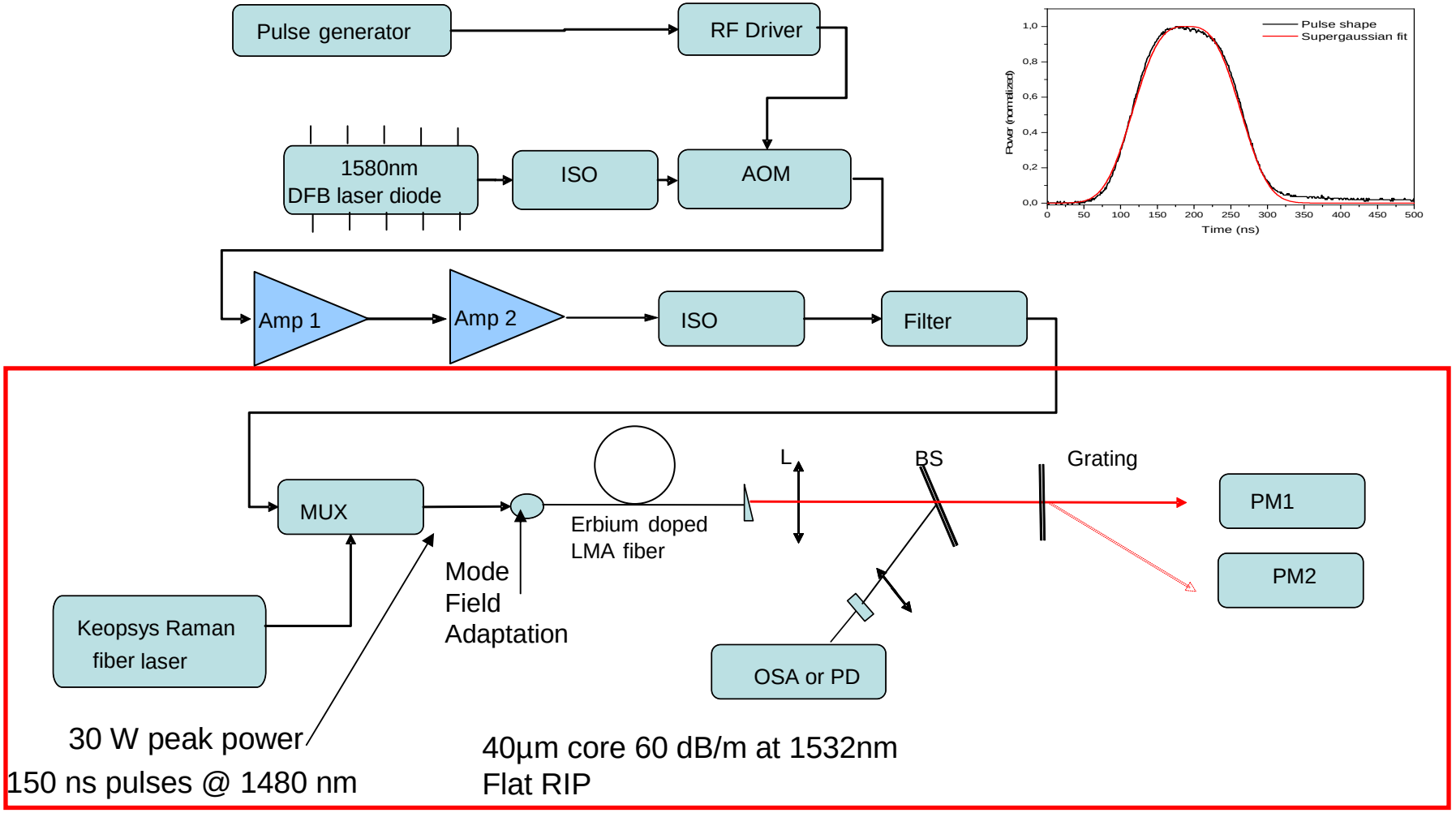
n^* transparency normalized population

ρ doping concentration limited in silica otherwise increases the paired ion concentration

L limited by SBS

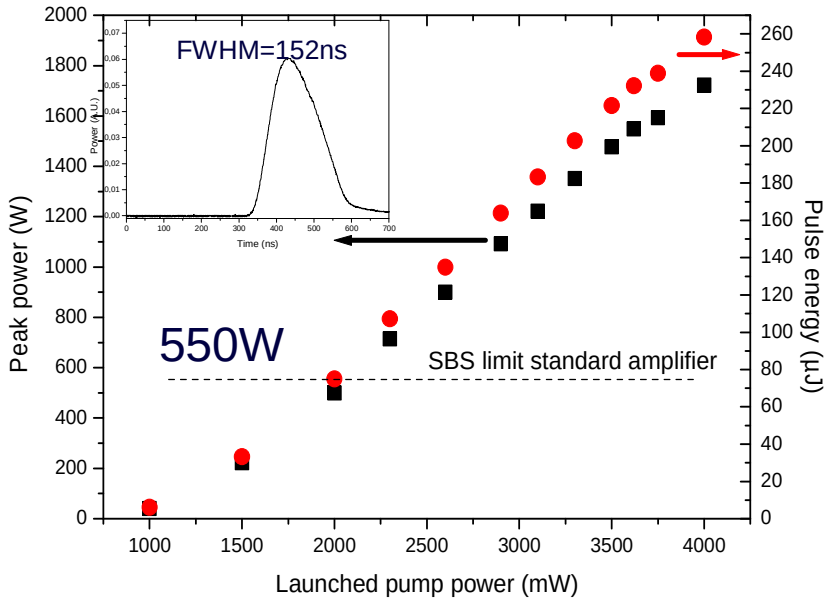
→ Pompage dans le cœur à 1480 nm

1579 nm fiber laser breadboard



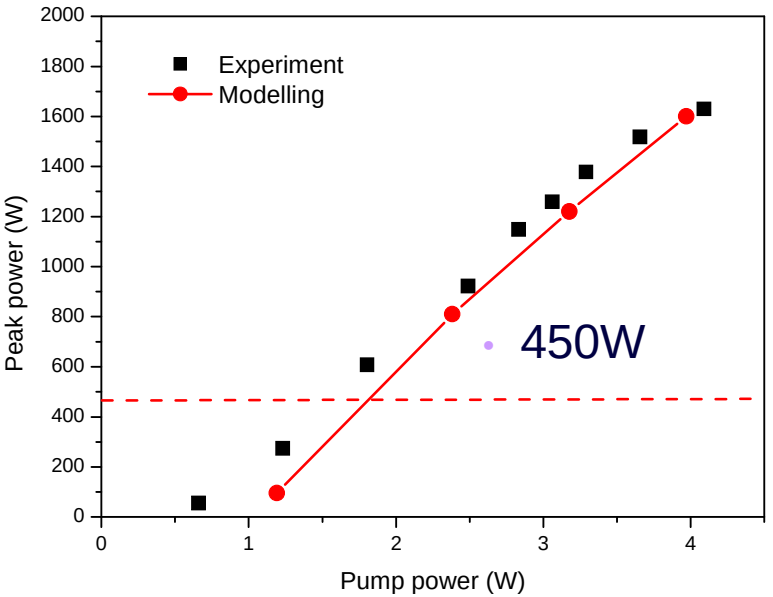
Laser fibré 3 étages à contrôle du seuil Brillouin: résultats experimentaux

Pc=1.7 kW E=245 µJ



23% efficiency

Modelling with g_B~1.2 10^{-11} m/W

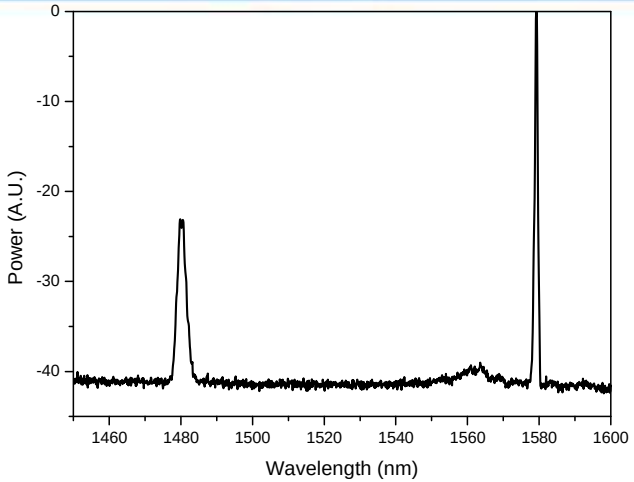


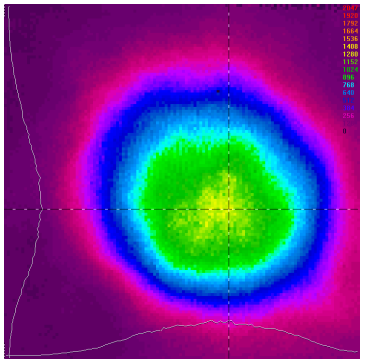
Predicted new SBS threshold ~ 2.5kW

Gain x 4 à 5 au niveau de l'amplificateur

G.Canat et Al. – CLEO Europe 2013

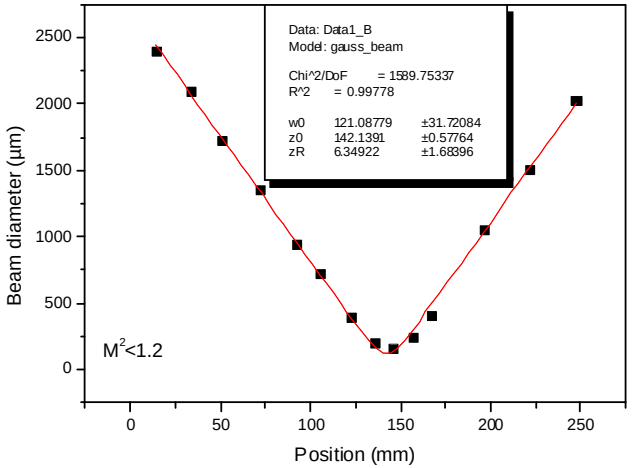
Laser breadboard: Spectral and spatial measurements





Near field

M^2 measurement



- generation of single frequency 150 ns 1.7 kW pulses peak power at 1580nm
- 3 stages MOPFA based on a core pumped LMA aluminosilicate fiber and a strain distribution (broadening ~x5 of Stokes spectrum)
- 23% efficiency
- Good beam stability is preserved

Plan

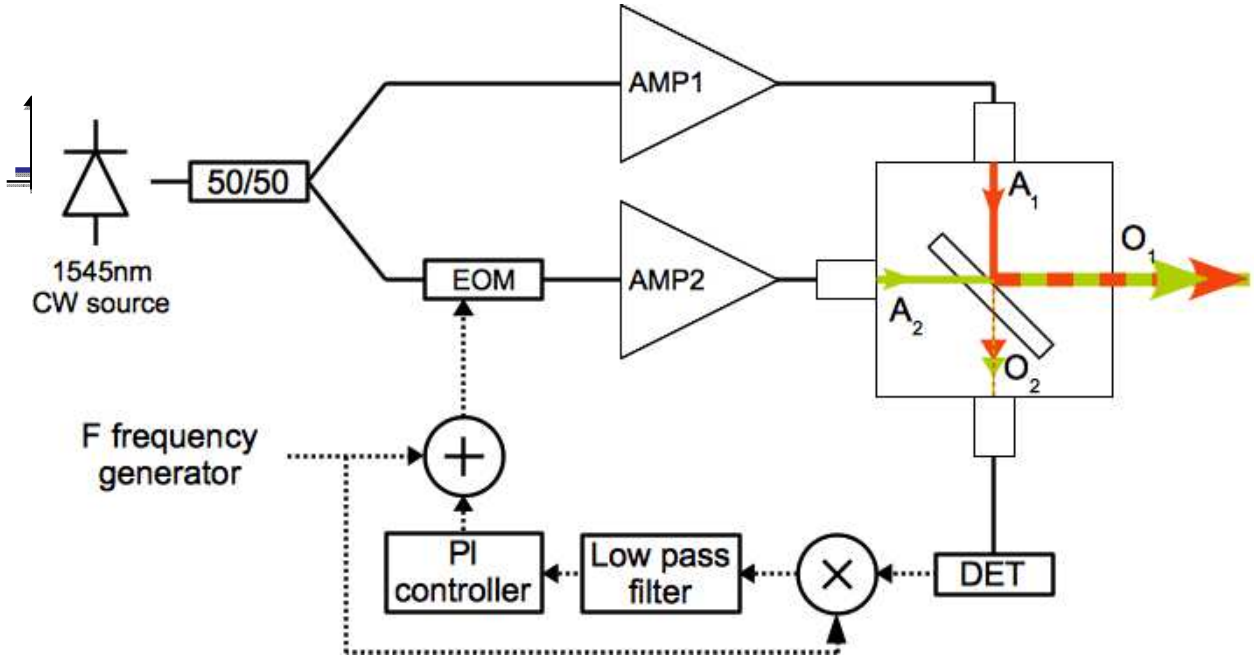
- Développements de sources fibrées à grande brillance spectrale
  - l'amplification fibrée: technologie
  - Comment monter en puissance ? Contrôle du seuil Brillouin
  - Application au dial spatial
  - Comment monter en puissance? Combinaison cohérente
  - Application au lidar vent

- Exploitation des non-linéarités des fibres dopées
  - Les sources à 2 µm
  - Génération de supercontinuum
  - Application à la détection de gaz

- La vibrométrie laser:
  - Principe et traitement de signal
  - Le hardware
  - Application au diagnostique sismique

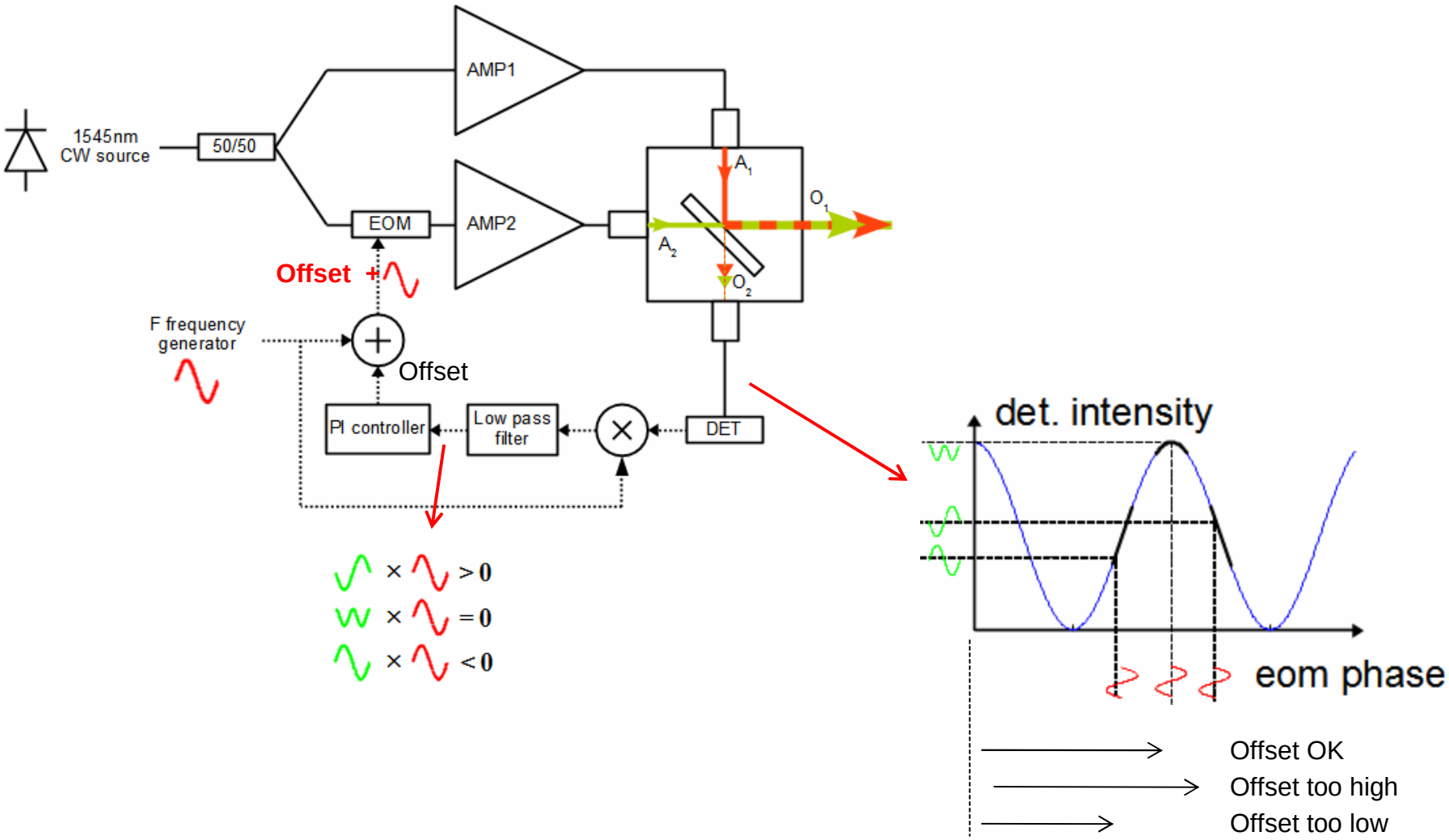
Coherent Combining – principle (1)

- Continuous wave regime
- Amp1 and Amp2 amplify the common MO
- Amp1 and Amp2 outputs overlap and interfere on a 50/50 beam splitter
- A CW multi-dithering phase controller is used (LOCSET) to minimize O_2 output (⇔ maximize O_1 output)



Coherent beam combination of narrow-linewidth 1.5µm fiber amplifiers in a long-pulse regime - Optics Letters, Vol. 36 Issue 4, pp.523-525 (2011) Lombard, L et Al.

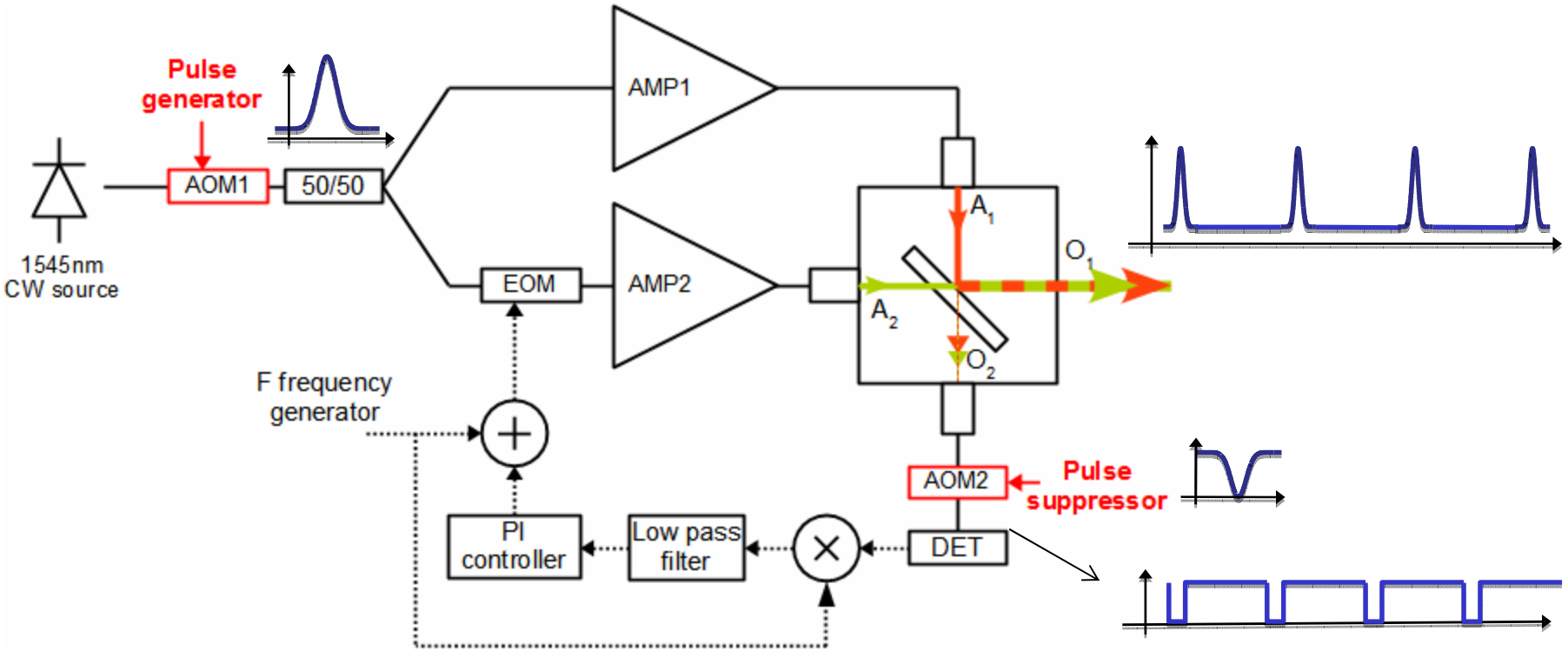
Multi-dithering technique principle



ONERA

Pulse Coherent Combining – principle (2)

- Pulsed regime : phase locking **between** the pulses
- AOM1 leaves a **leak** between the pulses (60 dB below peak)
- AOM2 **removes the pulses** and only let the **almost CW amplified leak** go to the detector
- A CW multi-dithering phase controller is used (LOCSET)



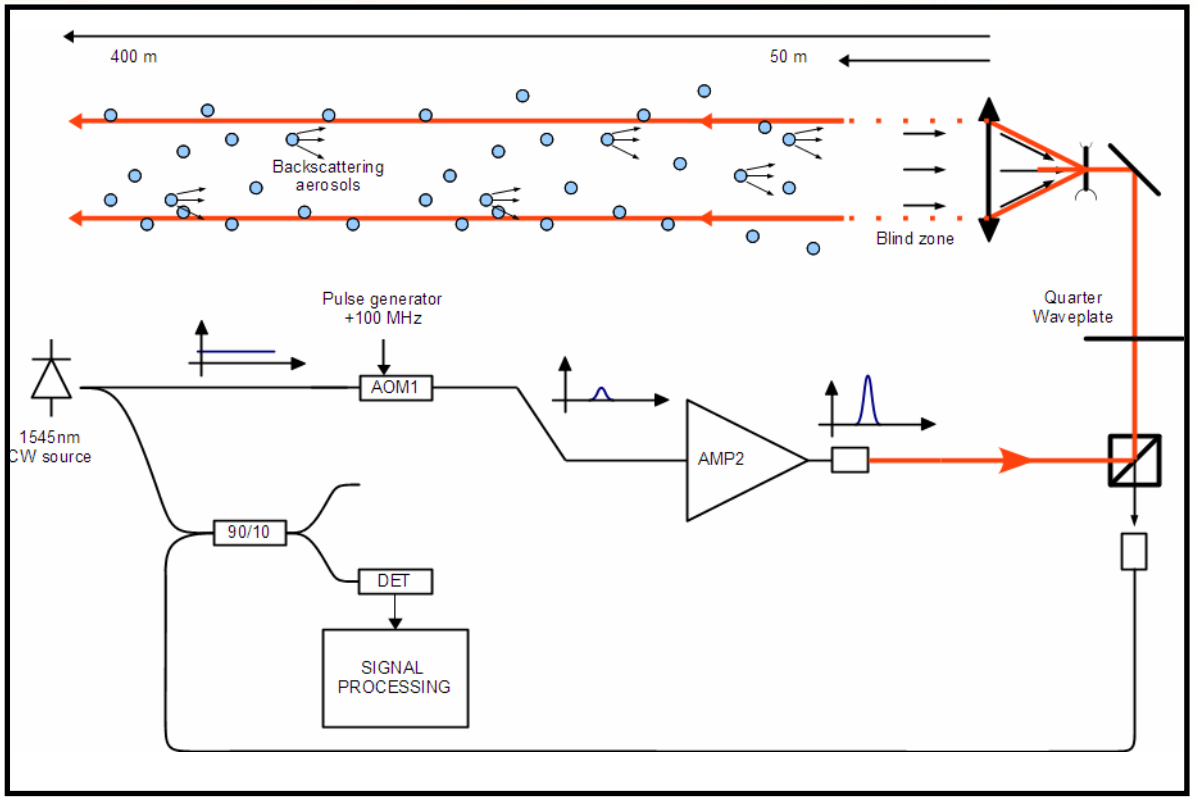
Plan

- Développements de sources fibrées à grande brillance spectrale
  - l'amplification fibrée: technologie
  - Comment monter en puissance ? Contrôle du seuil Brillouin
  - Application au dial spatial
  - Comment monter en puissance? Combinaison cohérente
  - Application au lidar vent

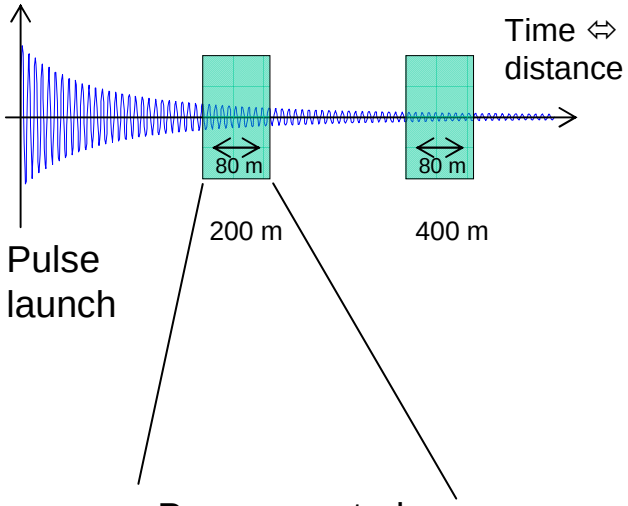
- Exploitation des non-linéarités des fibres dopées
  - Les sources à 2 µm
  - Génération de supercontinuum
  - Application à la détection de gaz

- La vibrométrie laser:
  - Principe et traitement de signal
  - Le hardware
  - Application au diagnostique sismique

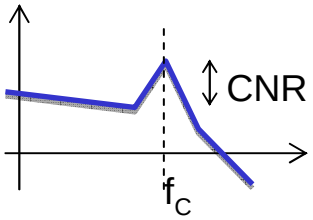
What is a Wind Lidar?



Detected beat signal @ 100 MHz + $f_{Doppler}$



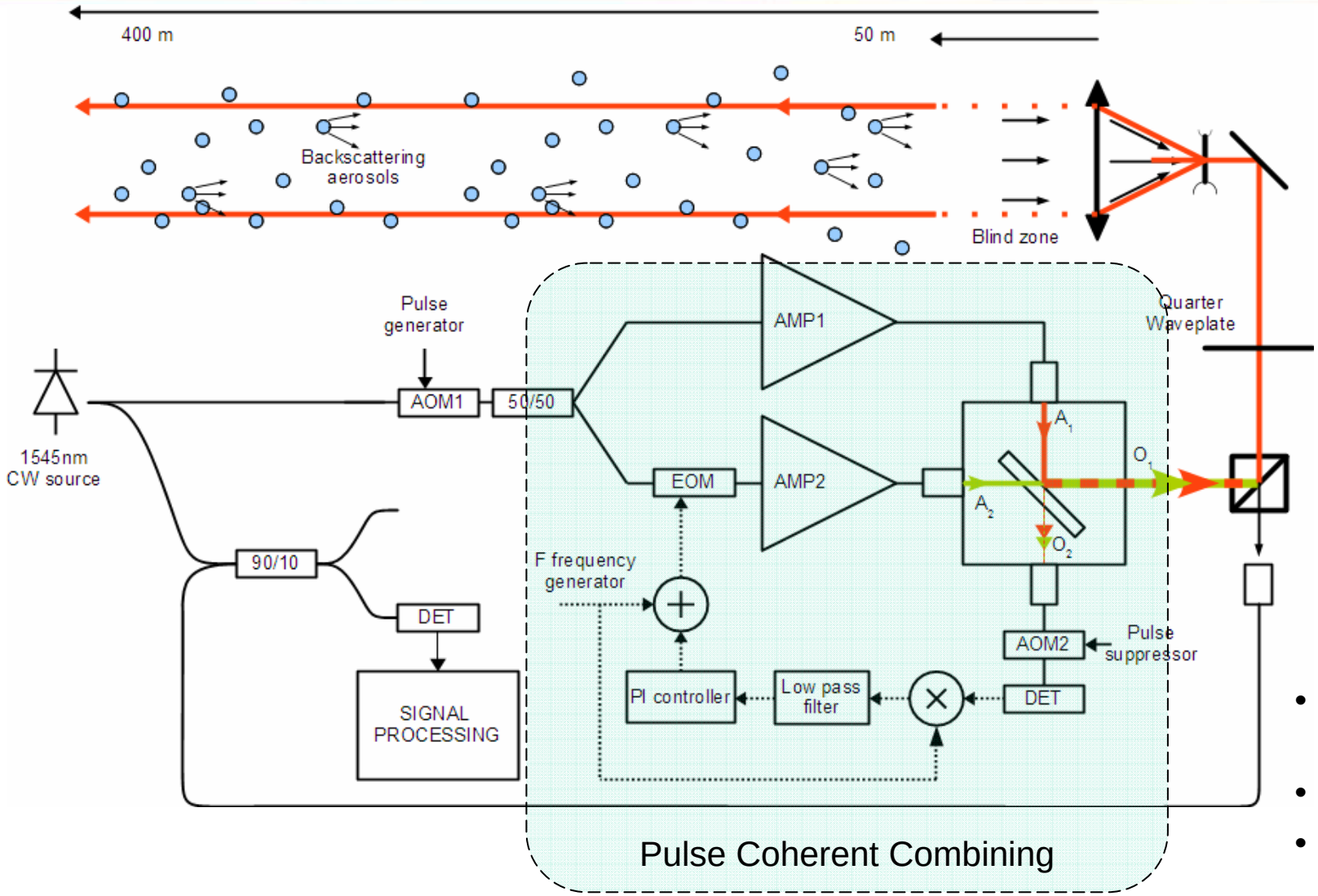
Power spectral density (PSD)



Extracted information for each time range

- **Carrier frequency** f_C = 100 MHz + $f_{Doppler}$
  - $f_{Doppler}$ => wind speed (1.3 MHz.(m/s)$^{-1}$)
- **Carrier to noise ratio** (CNR)
  - => theoretical error on wind speed
  - Depends on particle density and laser energy

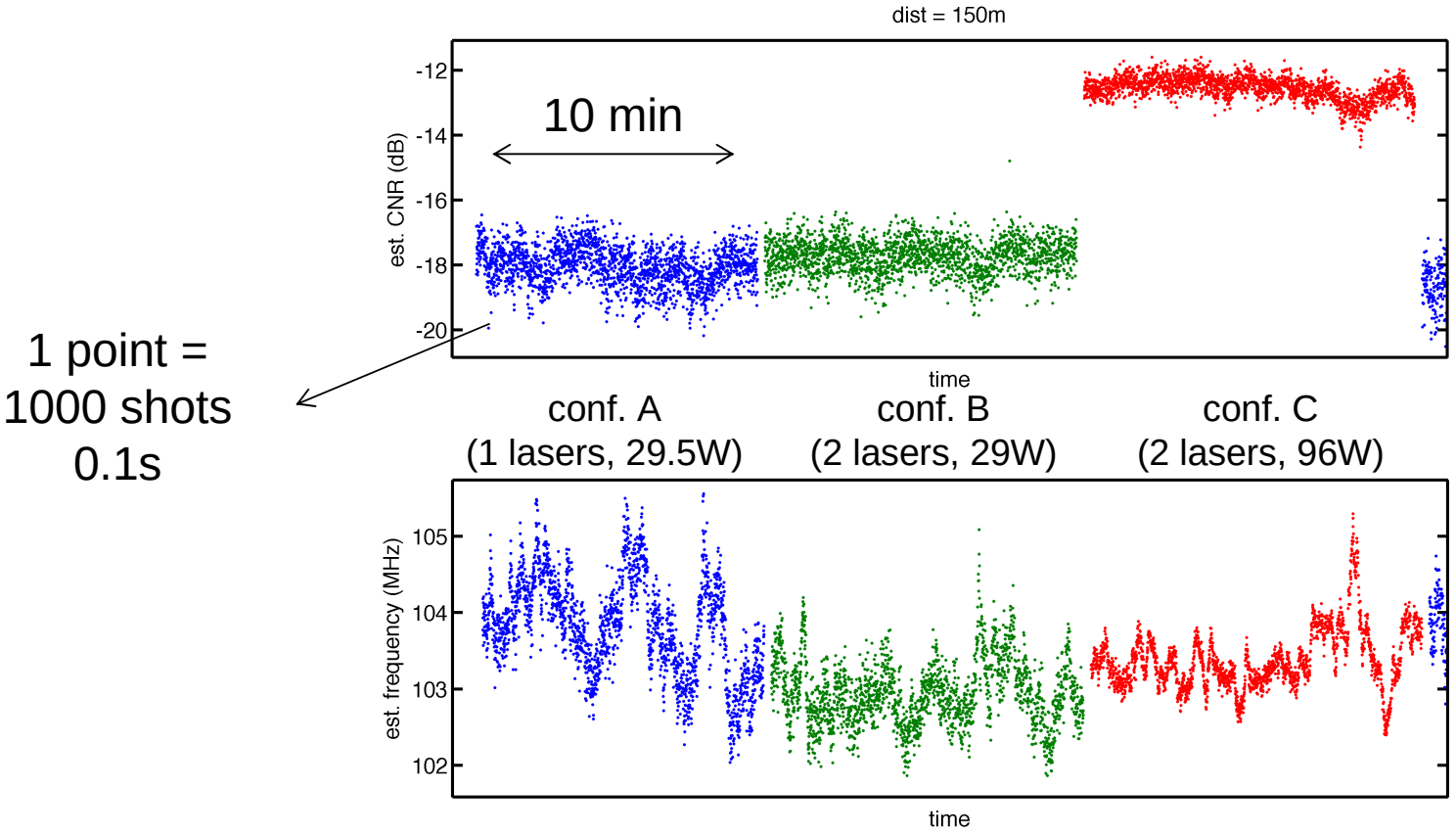
Experimental setup in this work



- 240-ns pulses
- 10kHz
- 50W peak power

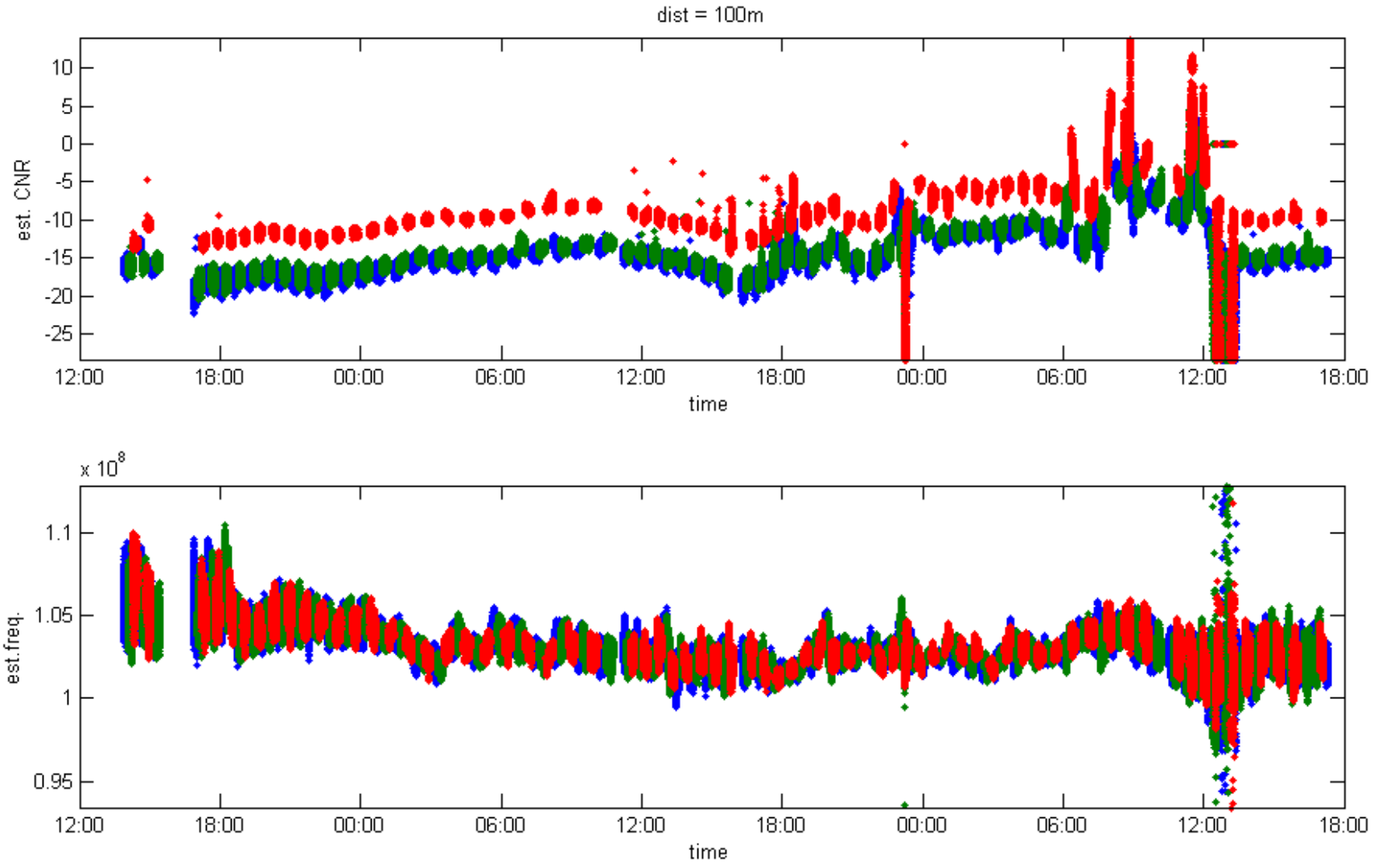
ONERA

Lidar performance comparison – CNR and estimated frequency



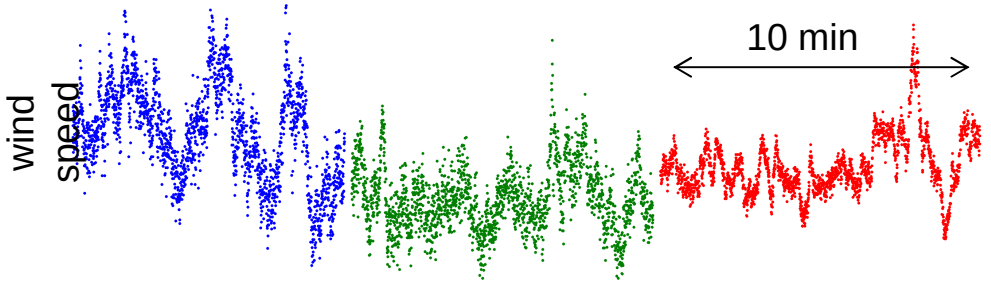
- CNR is equivalent for 1 and 2 beams (same power)
- CNR @ 96W is +5dB compared to CNR @ 29W (96/29 = 5.2dB)

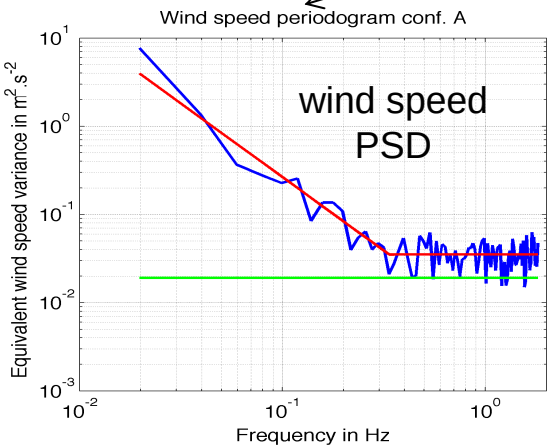
Long time measurement

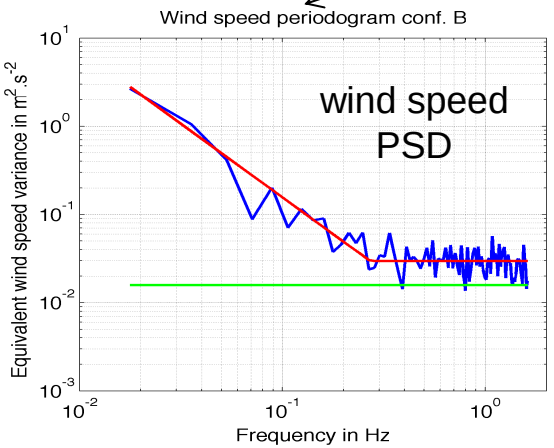


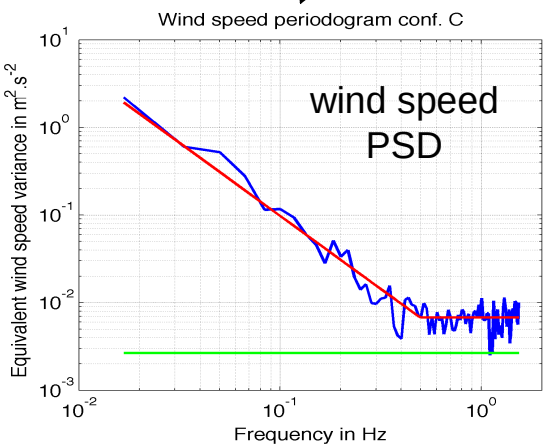
Lidar performance comparison – Instrument noise floor comparison

- Blue - 1min PSDs, averaged over 10min
- Red - fit with:
  - Kolmogorov law $f^{-5/3}$
  - noise floor
- Green – Cramér–Rao bound computed from CNR (theoretical error)









- Low freq. slope follows Kolmogorov law
- Instrument noise floor is identical in both conf. A and B, improved in conf. C
- Instrument noise floor complies with theory

Plan

- Développements de sources fibrées à grande brillance spectrale
  - l'amplification fibrée: technologie
  - Comment monter en puissance ? Contrôle du seuil Brillouin
  - Application au dial spatial
  - Comment monter en puissance? Combinaison cohérente
  - Application au lidar vent

- Exploitation des non-linéarités des fibres dopées
  - Les sources à 2 µm
  - Génération de supercontinuum
  - Application à la détection de gaz

- La vibrométrie laser:
  - Principe et traitement de signal
  - Le hardware
  - Application au diagnostique sismique

High peak power pulsed 2 µm fiber laser

Fiber technology assets @ 2 µm:
Efficiency, monolithic set up
Low non linearities
CO_2 absorption line

Applications :

o Supercontinuum using transparent fibers in bande II

o pumping of Optical Parametric oscillators (ZGP or GaAs) bande II & III

o Medical (chirurgy, ophtalmology)

o Plastics manufacturing and tagging

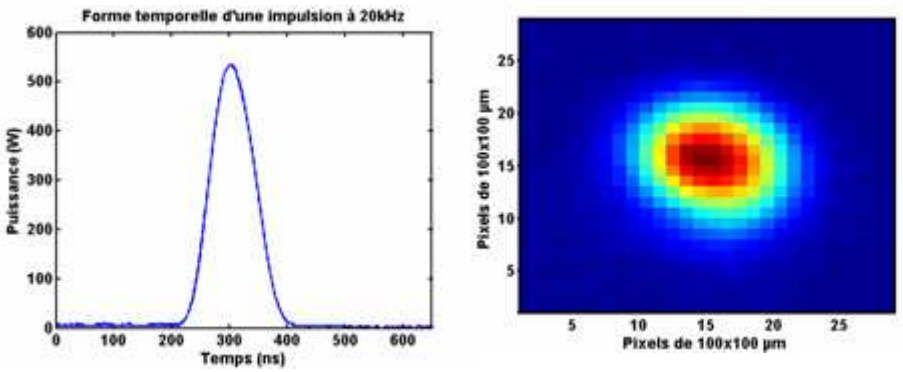
o Atmospheric characterization

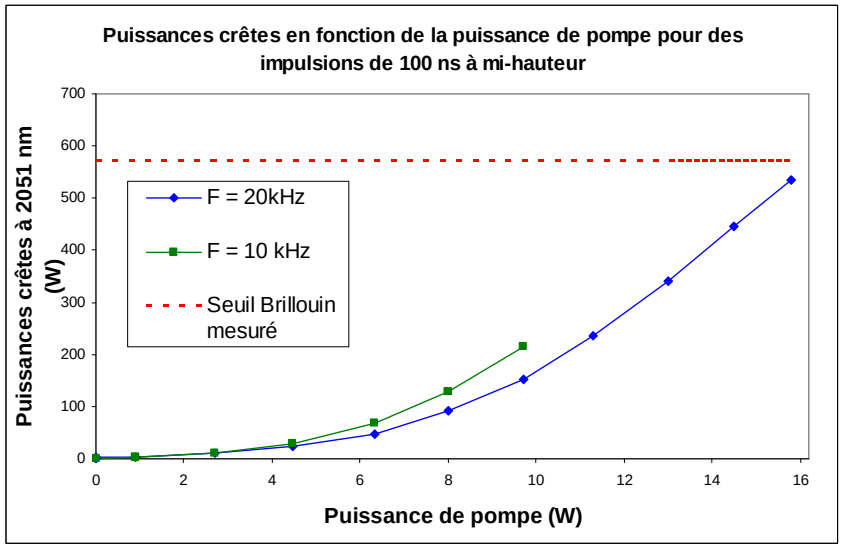
2 µm pulsed laser for OPO (MWIR) pumping

Goal: single mode, 2050 nm, 10 kHz, 100 ns, lineary polarized

535 W peak power (100 ns, 20 kHz)

Perspectives: improve the peak power by a factor of 3





Plan

- Développements de sources fibrées à grande brillance spectrale
  - l'amplification fibrée: technologie
  - Comment monter en puissance ? Contrôle du seuil Brillouin
  - Application au dial spatial
  - Comment monter en puissance? Combinaison cohérente
  - Application au lidar vent

- Exploitation des non-linéarités des fibres dopées
  - Les sources à 2 µm
  - Génération de supercontinuum
  - Application à la détection de gaz

- La vibrométrie laser:
  - Principe et traitement de signal
  - Le hardware
  - Application au diagnostique sismique

Supercontinuum: exploitation des non linéarités des fibres dopées

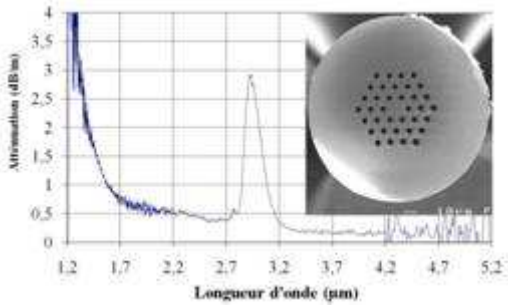
Aller dans l'IR moyen = disposer de matériaux transparents dans cette bande, savoir fabriquer des fibres (dopées) à partir de ces matériaux, connaître leurs caractéristiques physiques intrinsèques
→ comment fabriquer des matériaux transparents efficaces ?

(les sources puissantes disponibles sont en bande I)

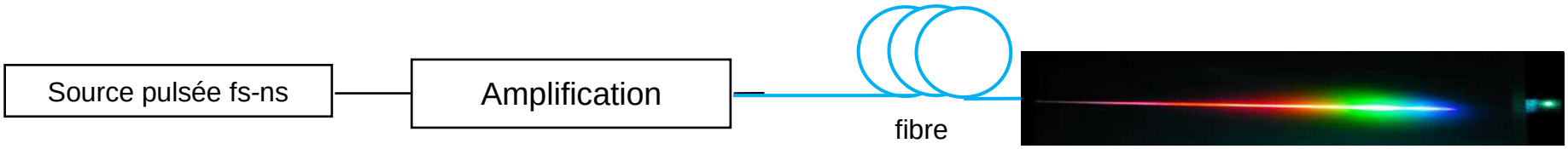
Exploitation des effets NL dans les fibres spéciales:

•sources fibrées en bande II dans les verres chalcogénures, verres fluorés, oxydes lourds
•amplification paramétrique dans les fibres infrarouges
•sources fibrées de forte puissance crête à 2 µm
•sources fibrées supercontinuum en bande II

Fibre microstructurée



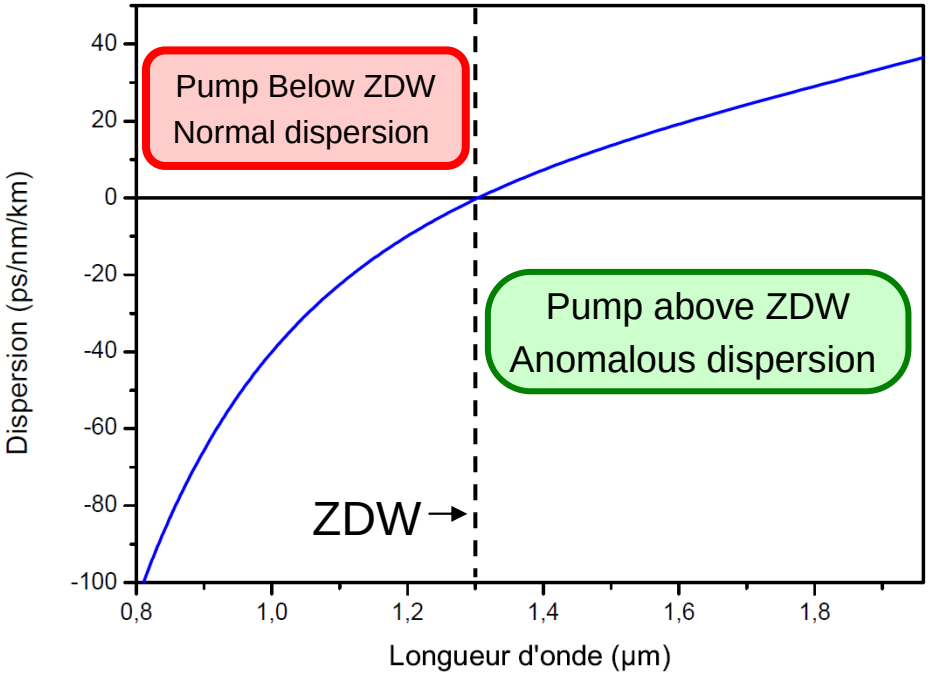
- **Intérêt des fibres par rapport aux matériaux "bulk"**
  - Confinement de la lumlière élevé → typiquement quelques µm²
  - Longueur d'interaction importante → typiquement qques mètres
  - Longueur d'onde du Zero-Dispersion (ZDW) peut être choisie par µ-structuration de la fibre



Super continuum large spectre

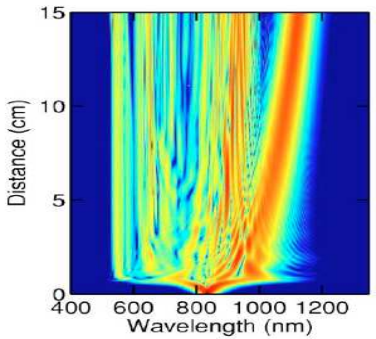
Mécanisme de génération du Supercontinuum

Fiber dispersion curve (here silica)



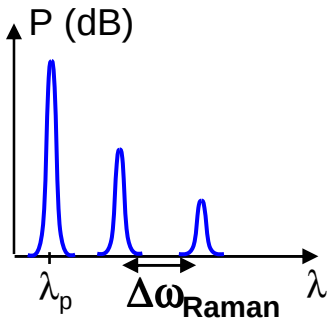
Pump above ZDW

- Soliton generation
- Soliton are redshifted by Raman effect

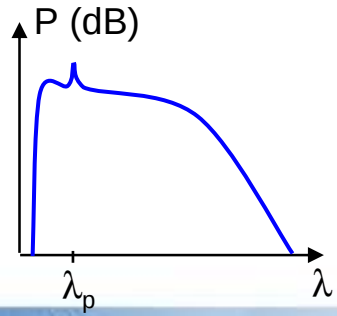


Pump below ZDW

- No solitons
- Raman peaks



Pumping above the ZDW is the best approach for efficient energy transfer from the pump toward the IR



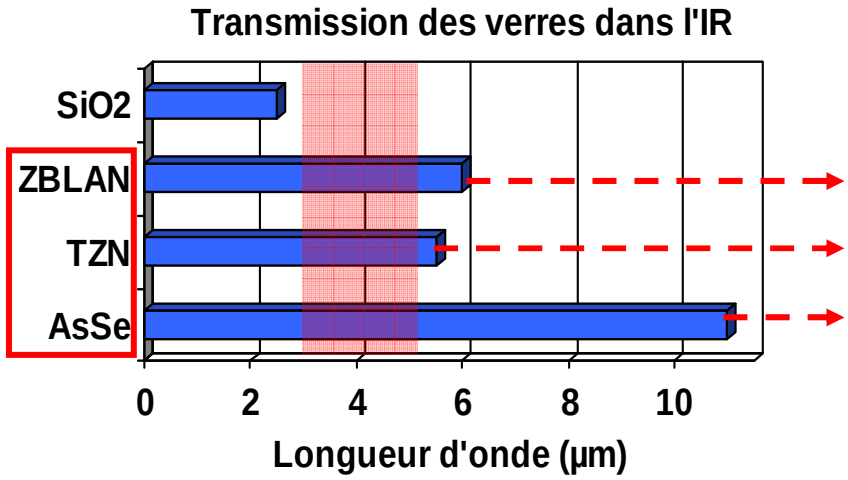
But…

If a Raman peak crosses the ZDW, soliton-induced SC generation is possible

ONERA

Infrared Propagation in fibers

- **The fundamental requirement is good IR transparency**



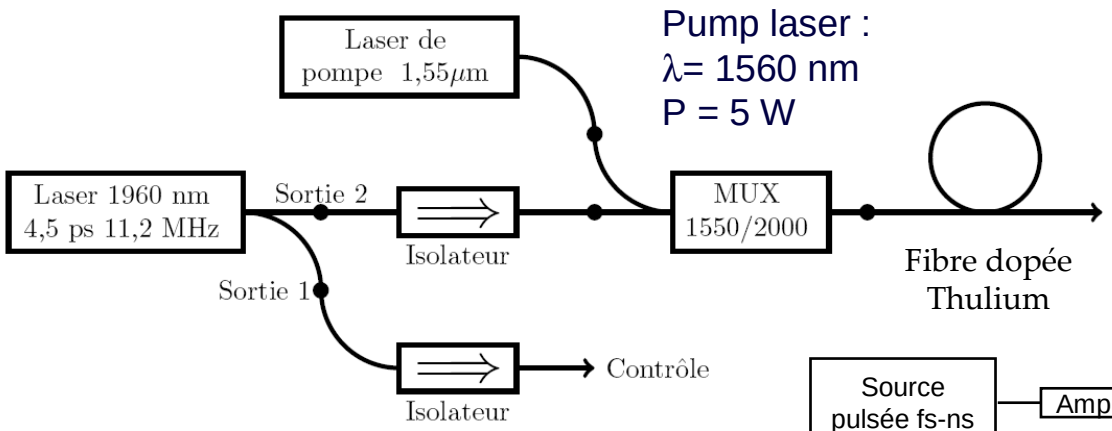
- **Three material families selected**
- Fluorides: ZrF_4 - BaF_2 - LaF_3 - AlF_3 – NaF
- Oxydes : TeO_2 - ZnO - Na_2O
- Chalcogenides : AsSe, AsS

- **Major optical properties for SC generation**

	Non-linearity index n_{2_verre}/ n_{2_SiO2}	**ZDW** (µm)
Silice	1	1,3
Fluorides (ZBLAN)	1,1	1,62
Oxydes (TZN)	17	2,2
Chalcogenides	100 - 800	5 - 7

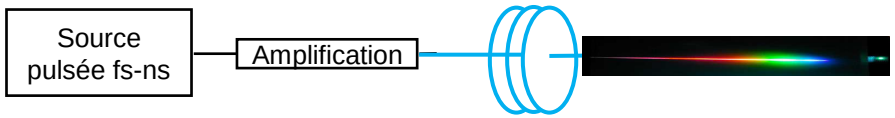
Thermal and mechanical properties are also important concerns in practice !

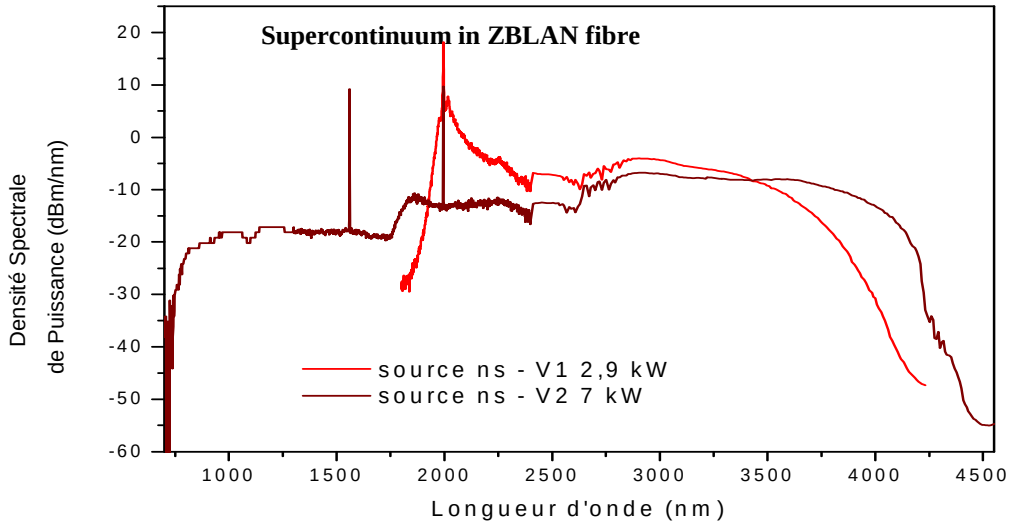
Mode locked 2 µm Picosecond laser for super continuum generation



Pulse width=3.5 ps

Fourrier transform limited pulses





Résultats

Puissance moyenne de sortie: 300 mW

70% de puissance moyenne au-delà de 2500 nm (fraction mesurée expérimentalement)

W. Renard et al., Optics Letters, Vol. 37, Issue 3, pp. 377-379, 2012
W. Renard et al., Proc. SPIE 8237, 82372N, 2012

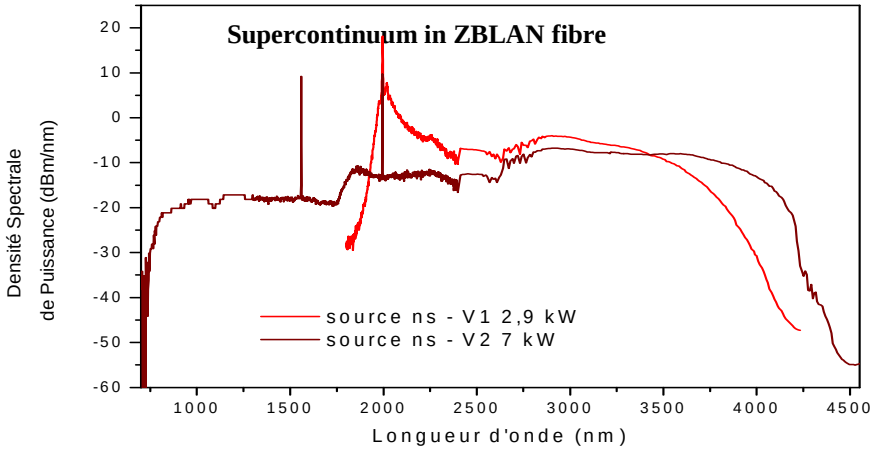
Plan

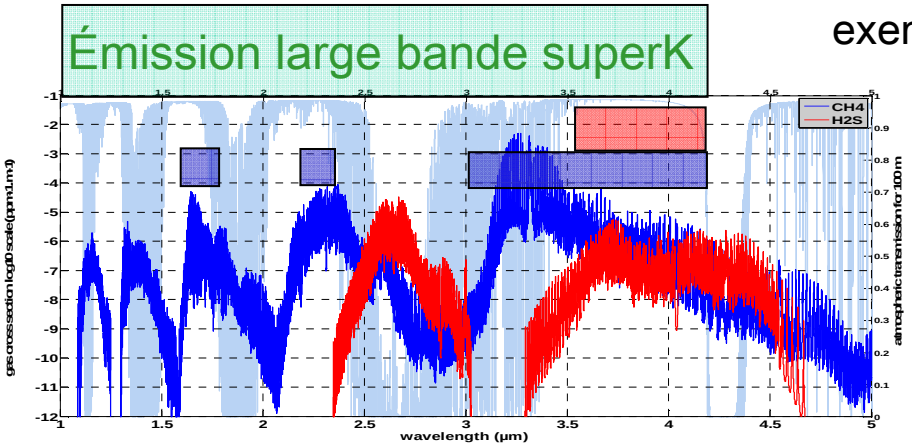
- Développements de sources fibrées à grande brillance spectrale
  - l'amplification fibrée: technologie
  - Comment monter en puissance ? Contrôle du seuil Brillouin
  - Application au dial spatial
  - Comment monter en puissance? Combinaison cohérente
  - Application au lidar vent

- Exploitation des non-linéarités des fibres dopées
  - Les sources à 2 µm
  - Génération de supercontinuum
  - Application à la détection de gaz

- La vibrométrie laser:
  - Principe et traitement de signal
  - Le hardware
  - Application au diagnostique sismique

Spectroscopie à distance par lidar à large spectre IR





exemple de bandes spectrales optimales d'analyse

H2S :fortement toxique

seuil de détectabilité olfactive: 0.03 ppm

seuil de toxicité: 50 ppm

CH4: explosif

LIE: 50 000 ppm

Seuil d'alerte: 5 000 ppm

L'analyse sur large bande spectrale permet de trier les interférents (H_2O, CO, CO_2, CH_2O, C_4H_{10}…)

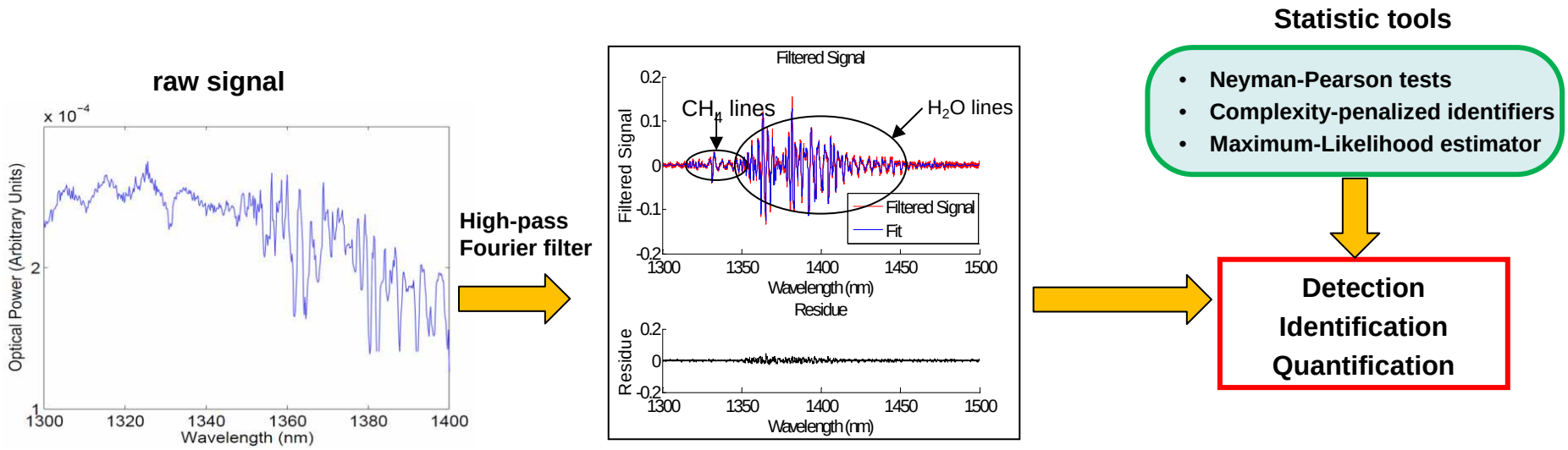
Algorithmes de démélange non supervisés → séparation CH_4-H_2S et autres interférents

→ détection – identification - quantification

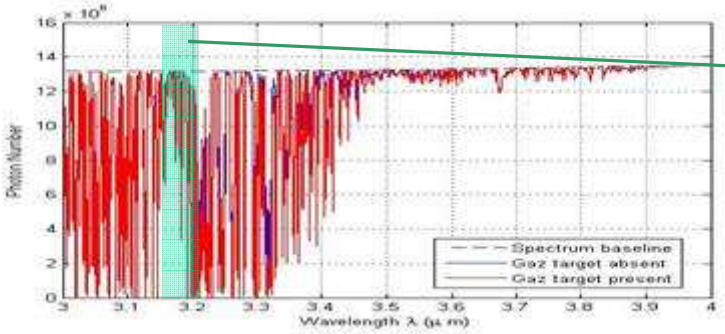
Signal processing for Supercontinuum DOAS

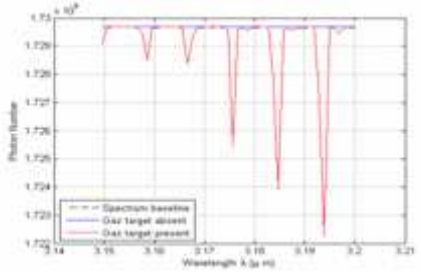
- **DOAS raw signal is composed of:**
  - **A smooth spectral baseline : generally not reproducible**
    - SC spectral enveloppe, background reflectivity
  - **Structured absorption peaks : highly reproducible**

- **In DOAS, baseline filtering is often performed**
  - Asset : non reproducible smooth spectral variations are suppressed
  - Drawback : smooth absorption spectra are more difficult to detect

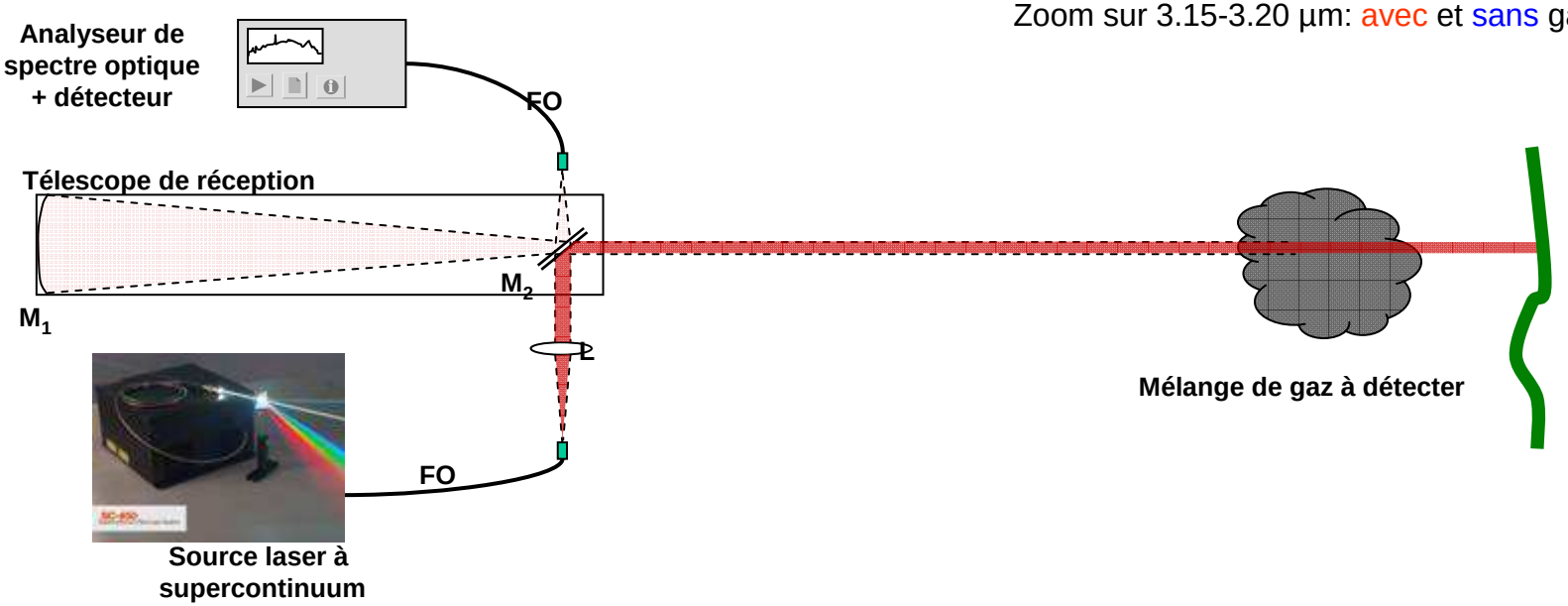


Non linéarités des fibres dopées
Lidar à source superK





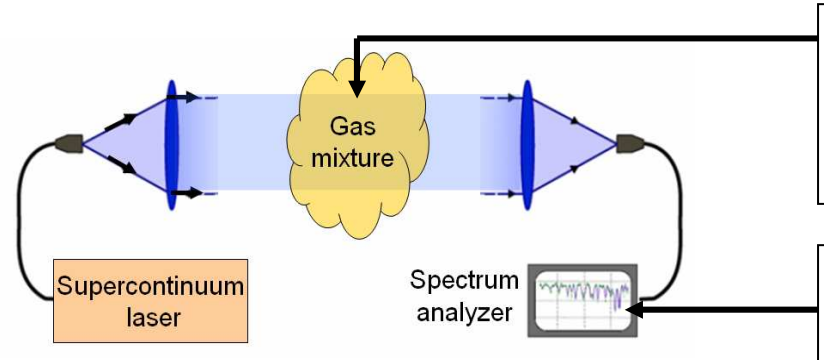
Zoom sur 3.15-3.20 µm: avec et sans gaz



J. Troles, Q Coulombier, M. Duhant, G. Canat, P. Toupin, L. Calvez, G. Renversez, F. Smektala, Jean Luc Adam, D. Mechin, L. Brilland., *"Low loss microstructured chalcogenide fibers for large non linear effects"*, Opt. Expr. Special issue on chalogenide glasses (2011)

Modèle de signal adapté au lidar supercontinuum

- Modelling of spectroscopic signals for a simple experiment



Water vapor H_2O	c_1 = 20 000 ppm.m
Methane CH_4	c_2 = 60 ppm.m
Acetylene C_2H_2	c_3 = 100 ppm.m
Ethane C_2H_6	c_4 = 60 ppm.m

Wavelength span	3.0-3.6 µm
Sample vector λ_k	500 points
Slit function g(λ)	5 nm FWHM

- Signal model

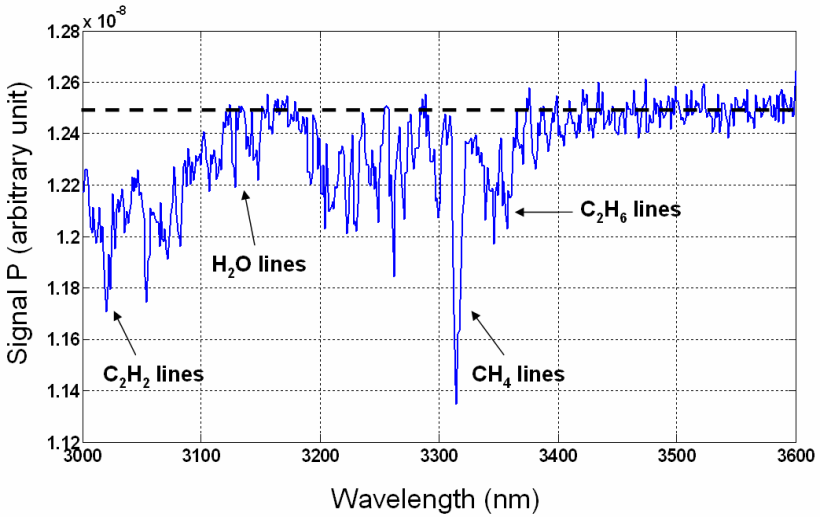
$$S_k = \left[a_0(\lambda).\exp\left(-L\sum_{i=1}^{4} H_{hr-i}(\lambda).c_i(\lambda) \right) \otimes g(\lambda) \right]_{|\lambda_k} + n$$

Ligne de base — Distance — Concentration gaz — Fonction d'appareil (résolution) — Longueurs d'ondes d'échantillonnage — bruit

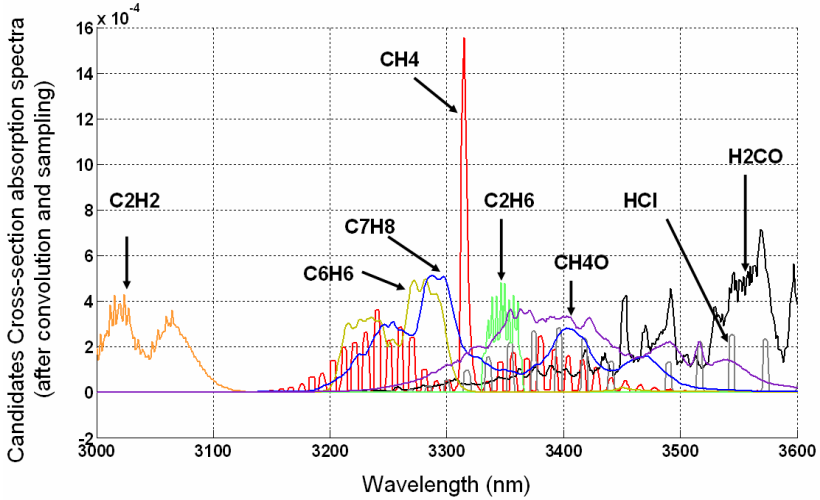
Sections efficaces d'absorption à Haute-Résolution → Code spécifique développé

Identification

signal at hand



Candidate gas cross sections (convolved, and sampled like the signal)



- Liste de 14 gaz candidats (pour 4 présents) : **comment identifier ? Et quantifier ?**

Compound	H2O	O3	NO2	NH3	CH4	H2CO	HCl	C2H2	C2H6	C6H6	C7H8	N2O	C2H4	CH4O
True c (ppm.m)	*20 000*				*60*			*100*	*60*					

- Modèle approché de Y=log(Signal) : valide pour les faibles (<0.3) épaisseurs optiques HR

$$Y = \ln(a_0) + \ln\left[\exp\left(-\sum_{i=1}^{4}\left([H_{hr-i}(\lambda).\otimes g(\lambda)]_{|\lambda SA}\right)c_i\right)\right] \longrightarrow Y \approx b_0 - \sum_{i=1}^{4}\tilde{H}_i c_i$$

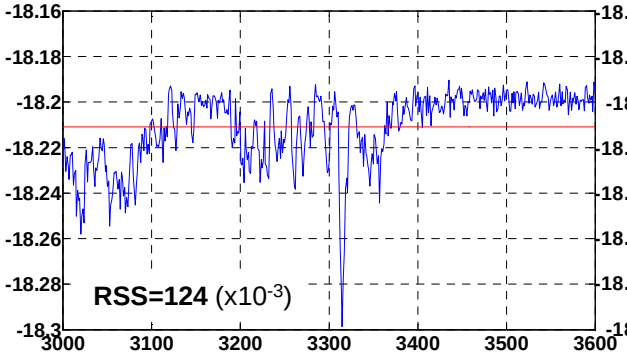
Multi-Linear equation

Convolved, sampled spectra

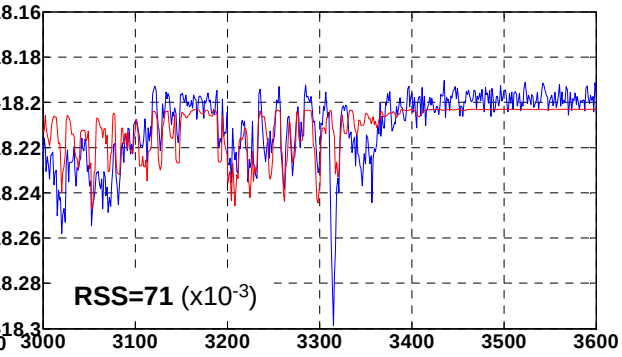
ONERA

Illustration du fonctionnement d'un algorithme pénalisant la complexité

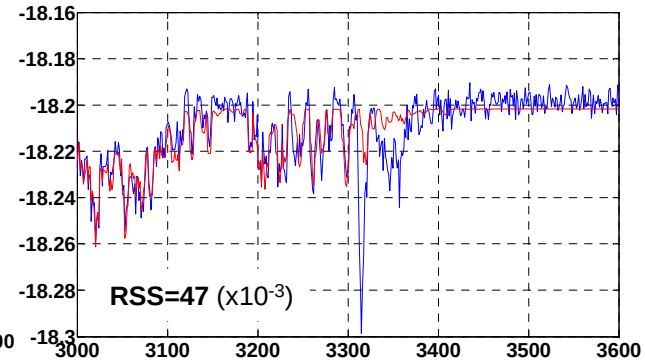
- **Exemple : l'algorithme trouve bien 4 espèces parmi 14 candidats interférents**



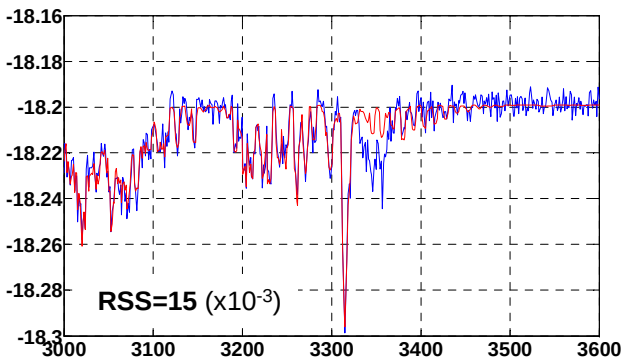
Step 1: Finds a baseline



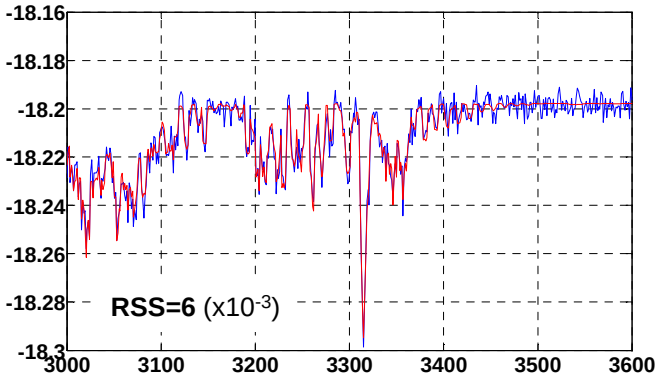
Step 2: Adds H_2O, adjusts baseline



Step 3: Adds C_2H_2, adjusts others



Step 4: Adds CH_4, adjusts others



Step 5: Adds C_2H_6, adjusts others

IDENTIFICATION FINISHED

No other gas species meets the criterion Δ decrease

Dobroc et al. Appl.Opt. 2012

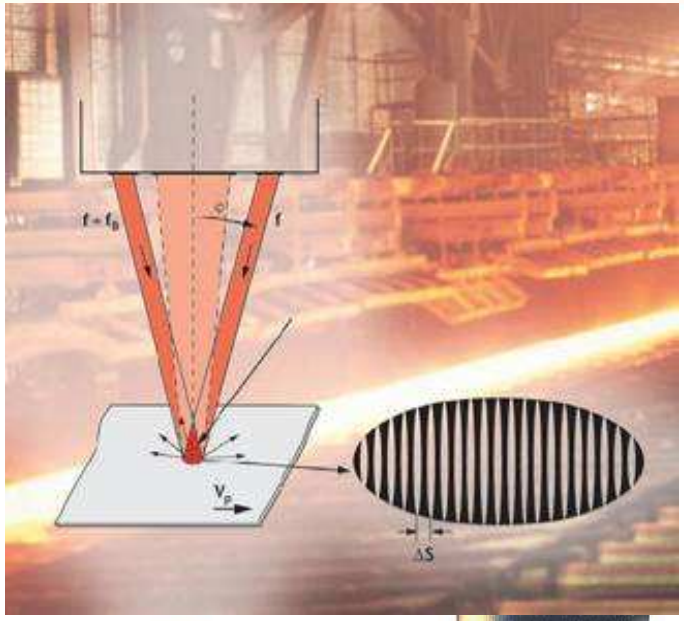
Plan

- Développements de sources fibrées à grande brillance spectrale
  - l'amplification fibrée: technologie
  - Comment monter en puissance ? Contrôle du seuil Brillouin
  - Application au dial spatial
  - Comment monter en puissance? Combinaison cohérente
  - Application au lidar vent

- Exploitation des non-linéarités des fibres dopées
  - Les sources à 2 µm
  - Génération de supercontinuum
  - Application à la détection de gaz

- La vibrométrie laser:
  - Principe et traitement de signal
  - Le hardware
  - Application au diagnostique sismique

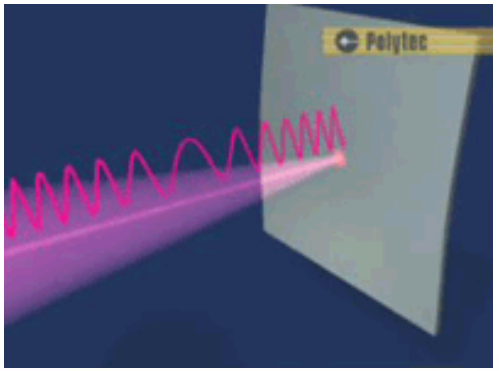
Vélocimètres de surface: applications courte portées (qques m)



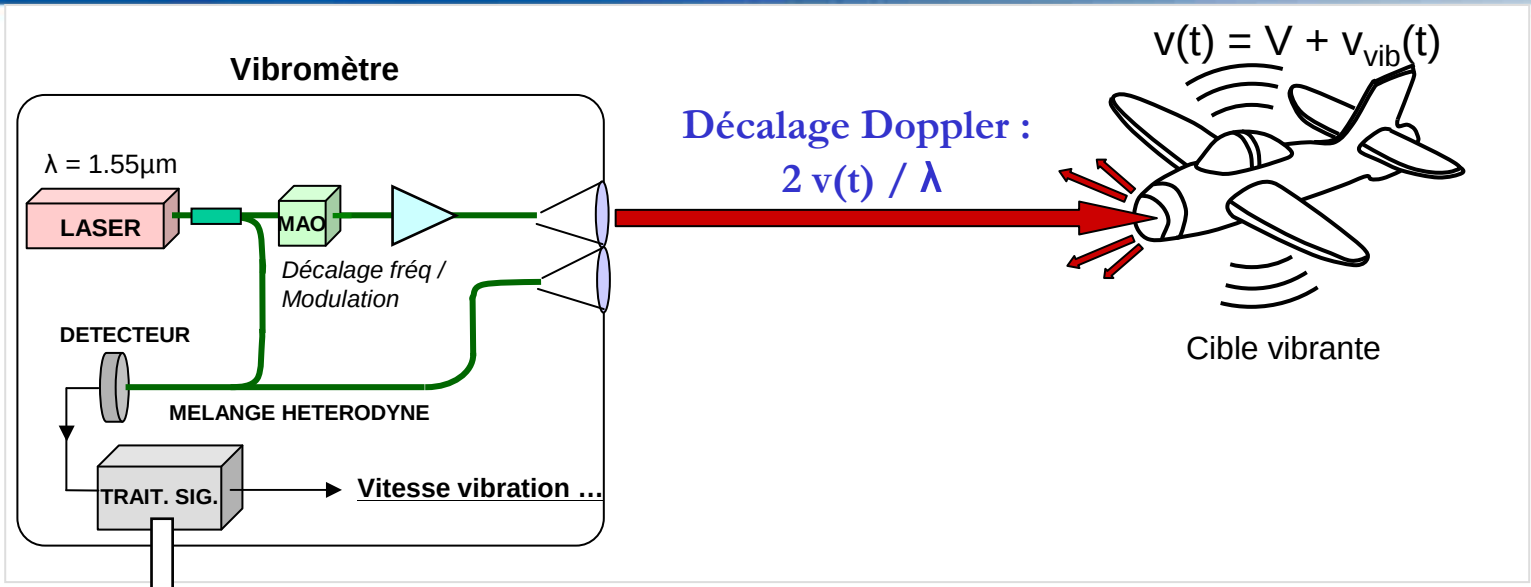
Caractéristiques de l'optique	
Longueur d'onde	690 nm (Faisceau visible)
Puissance du Laser	< 24 mW
Classe Laser	3B
Taille du faisceau	2 mm x 4 mm

Propriétés métrologiques				
Distance de mesure	300 mm	500 mm	700 mm	1000 mm
Profondeur de champ	20 mm	30 mm	50 mm	75 mm
Gamme mesure [m/min]	2.1 / 1330	3.2 / 1990	4.2 / 2650	5.7 /3630
Unités de mesure	mm/s, m/min, m or ft, ft/s, ft/min (configurable)			
Précision	<0.05 % de la valeur mesurée*			
Répétatibilité	<0.02 % de la valeur mesurée			
Vitesse traitement signal	1024 s			

Analyse 3D pour l'étude structurelle automobile



Vibromètre laser longue portée

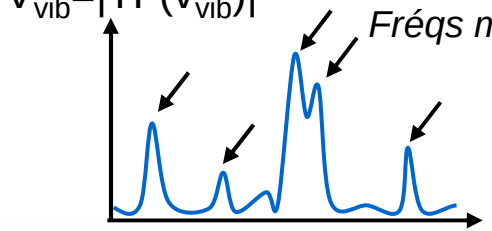


$i_{het} = i_0 \cos(2\pi \mathbf{f} t)$ *Courant hétérodyne*

$f(t) = f_{MAO} + 2\,V(t)/\lambda + 2\,v_{vib}(t)/\lambda$

Modulation de fréquence

$V_{vib} = |TF(v_{vib})|$



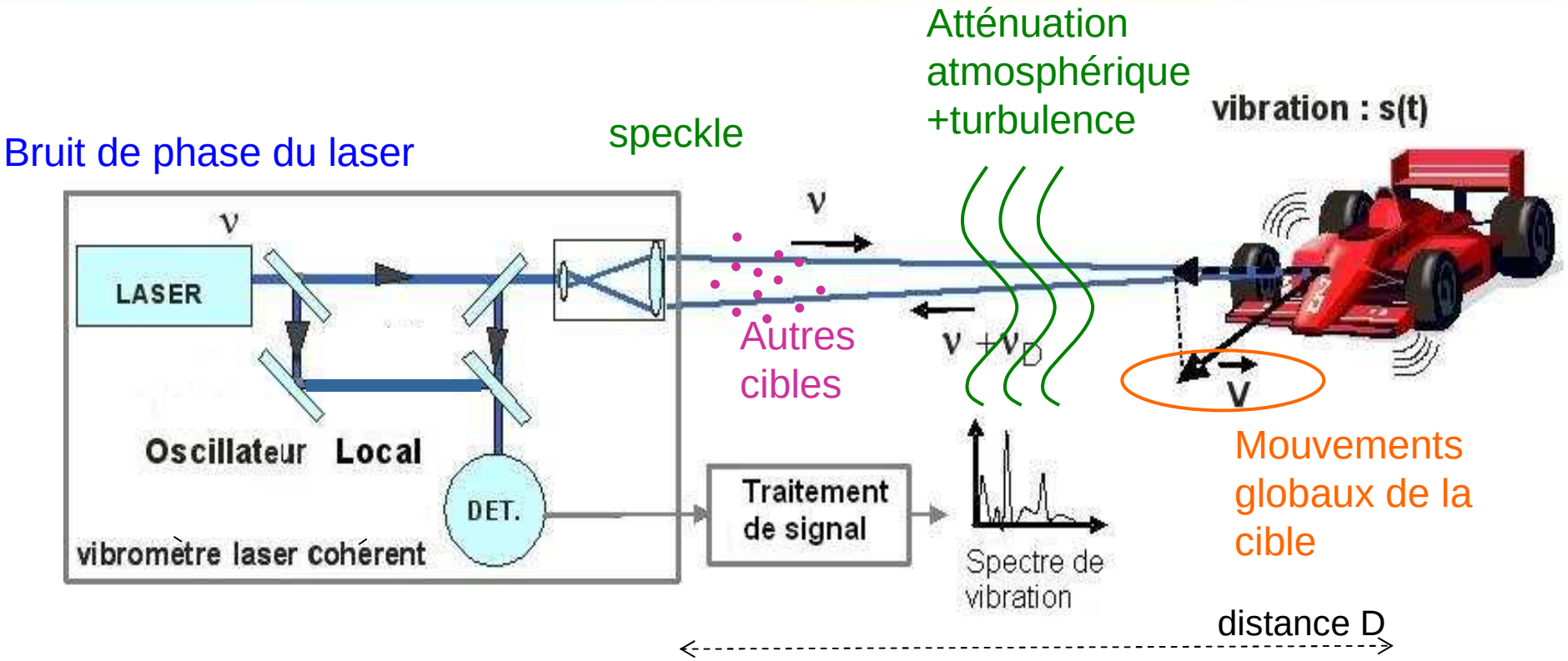
Emission

continue ou impulsionnelle

→ robustesse du traitement

→ facilité d'emploi (monostatisme)

Principe du vibromètre (1/2)



$$i_{het} = I.\cos[(\omega_{retour} - \omega_{ol})t]$$

$$i_{het}(t) = I_0(t).\cos[\Delta\omega.t + \frac{4\pi}{\lambda}D + \frac{4\pi}{\lambda}V_D.t + \frac{2\pi}{\lambda}\gamma.t^2 + \frac{4\pi}{\lambda}a_v.\cos(2\pi.f_v.t) + \varphi(t)]$$

$$+ i_{het,autreCible}$$

Principe du vibromètre (2/2)

$i_{het} = i_0 \,.\, M(t) \cos(2\pi f_{MAO} t - 2\pi f_{dop} t + \Phi_{distance}(t) + \Phi_{vib}(t) + \Phi_b(t)) + i_b(t)$

- Modèle gaussien (OL, signal)
- Troncature limitée ($R_{pup} = \sqrt{2}.\sigma_L$)
- En faisceau collimaté
- Pupille emission=pupille réception
- Ondes Signal et OL identiques sur les pupilles emission et reception

$$\left\langle i_{het}^2 \right\rangle = 4S^2 T_{atmAR} \rho T_{ins} . P_s P_{ol} . \pi \frac{\sigma_L^2}{Z^2} . \eta_{het}$$

$$\eta_{het} = \eta_{turb} . \eta_{speckle} . \eta_{polar}$$

$$\eta_{turb} = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_L^2}{S_o^2(Z)} + \frac{k^2 \sigma_L^4}{4Z^2}}$$

So(Z): longueur de cohérence transverse
après propagation turbulente sur une distance Z
σ_L: rayon gaussien à $1/e^2$

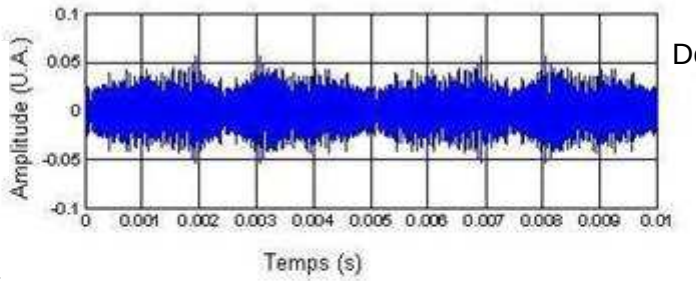
$$\frac{1}{2} \le \eta_{polar} \le 1 \qquad \eta_{speckle} \approx \frac{1}{2}$$

Conception de l'instrument : paramètres importants

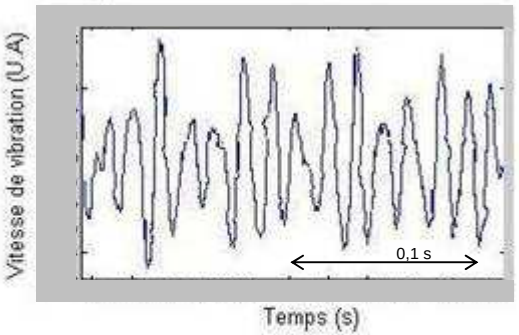
- Le rapport porteuse à bruit (CNR)
- Le rapport signal à bruit (SNR)

CNR calculé à partir du courant hétérodyne

$$CNR = \frac{\left\langle i_{het}^2(t) \right\rangle}{\left\langle i_b^2(t) \right\rangle}$$



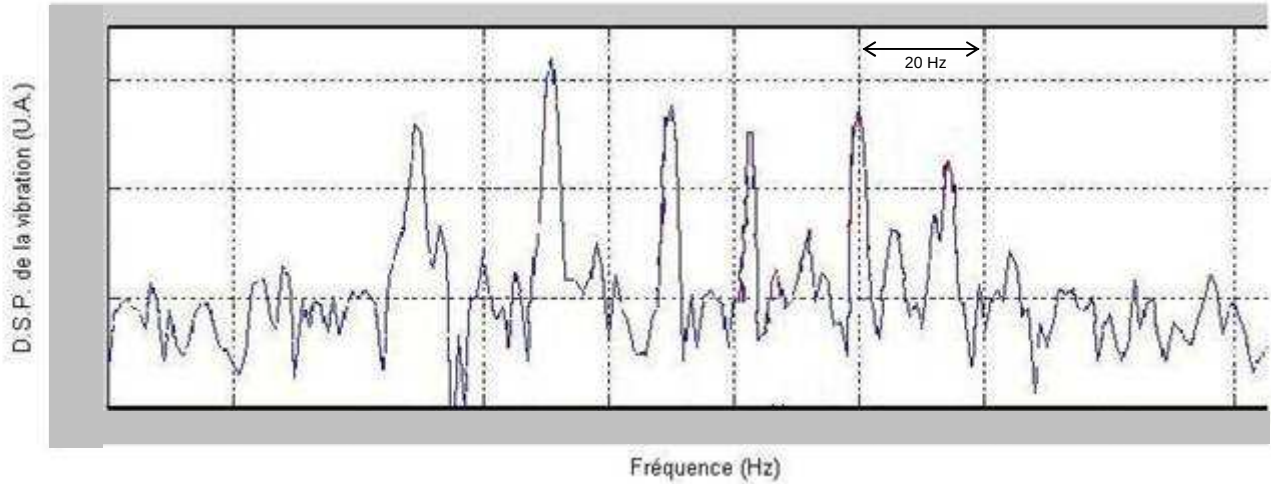
Démodulation



Transformée de Fourier

SNR calculé à partir de la vitesse de vibration démodulée

$$SNR = \frac{\left\langle V_{vib}^2(t) \right\rangle}{\left\langle v_{b,vibration}^2(t) \right\rangle}$$

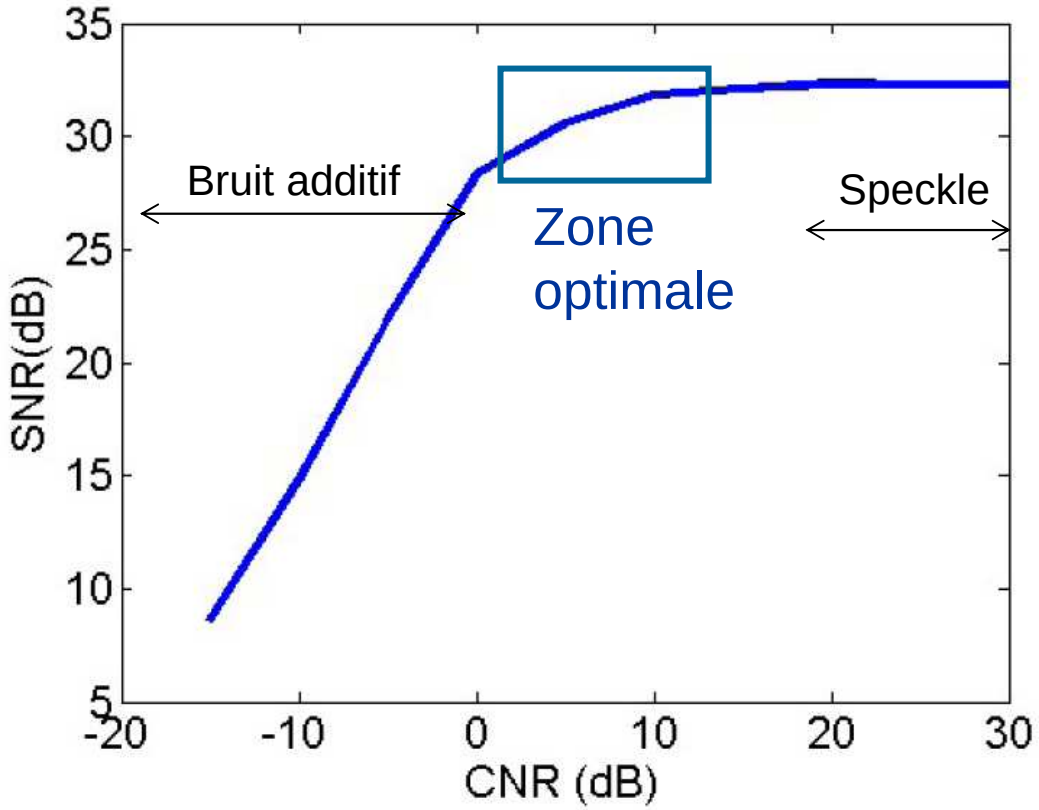


ONERA

Conception de l'instrument : traitement du signal

Allure de la courbe «Rapport Signal à Bruit» / «Rapport Porteuse à Bruit» : saturation à fort Rapport Porteuse à Bruit

Bruit de détection additif : photons, électronique
Bruit d'amplitude et phase / de décorrélation: speckle cible, laser, atmosphère

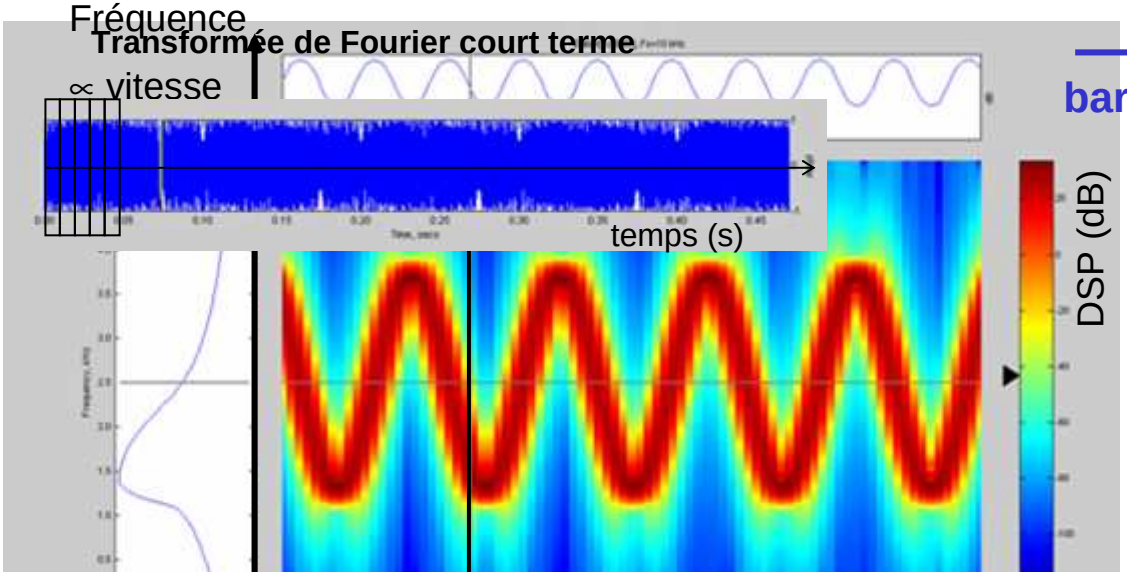


Conception de l'instrument : traitement du signal

- Traitement temps-fréquence par spectrogramme :
  évaluation de la fréquence instantanée du courant hétérodyne

$$i_{het}(t) = E.\cos(w(t)) = E.\cos(2\pi.f_0.t + \beta.\sin(2\pi.f_m.t))$$

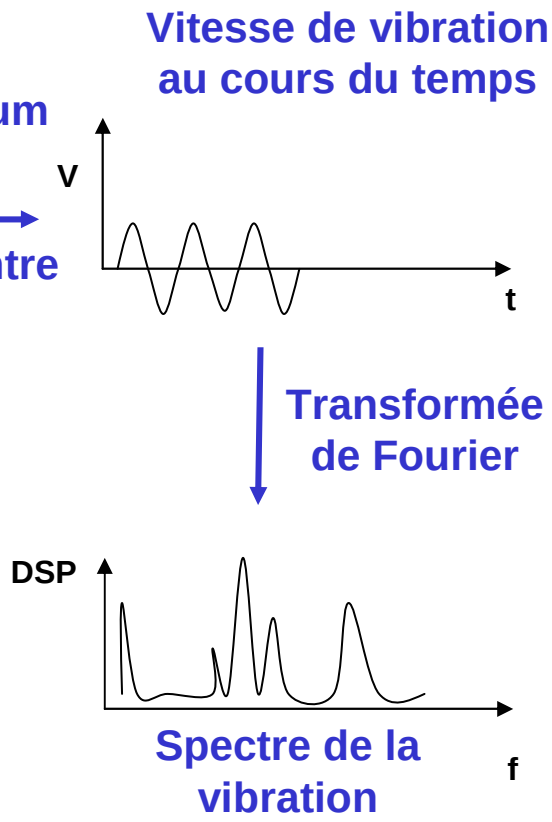
$$f_{inst} = \frac{1}{2\pi}.\frac{\partial}{\partial t}(w(t)) = f_0 + \frac{\beta}{2\pi}.f_m.\cos(2\pi.f_m.t)$$



Maximum

Ou

barycentre



- Compromis sensibilité / gamme de fréquence

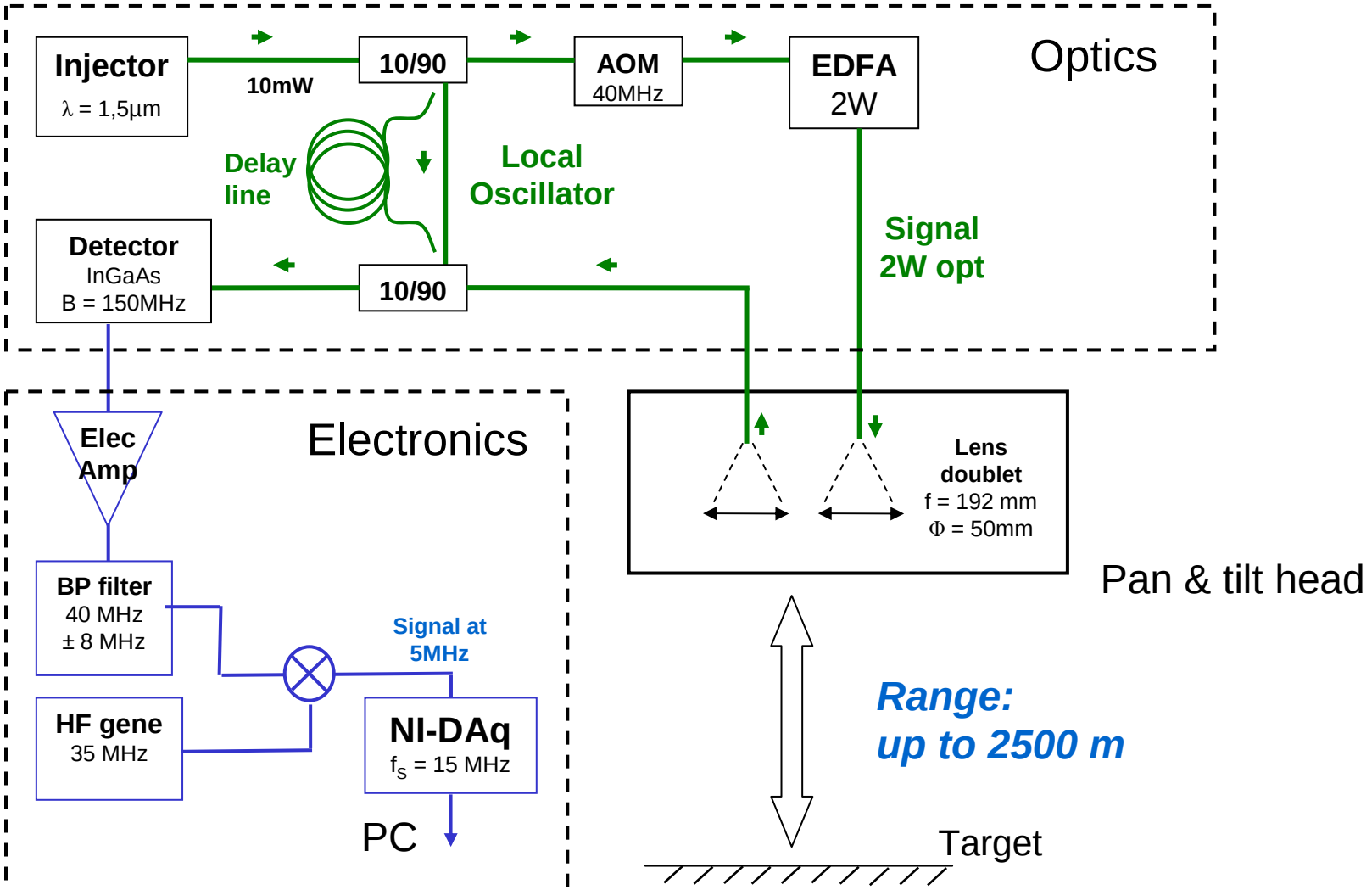
Plan

- Développements de sources fibrées à grande brillance spectrale
  - l'amplification fibrée: technologie
  - Comment monter en puissance ? Contrôle du seuil Brillouin
  - Application au dial spatial
  - Comment monter en puissance? Combinaison cohérente
  - Application au lidar vent

- Exploitation des non-linéarités des fibres dopées
  - Les sources à 2 µm
  - Génération de supercontinuum
  - Application à la détection de gaz

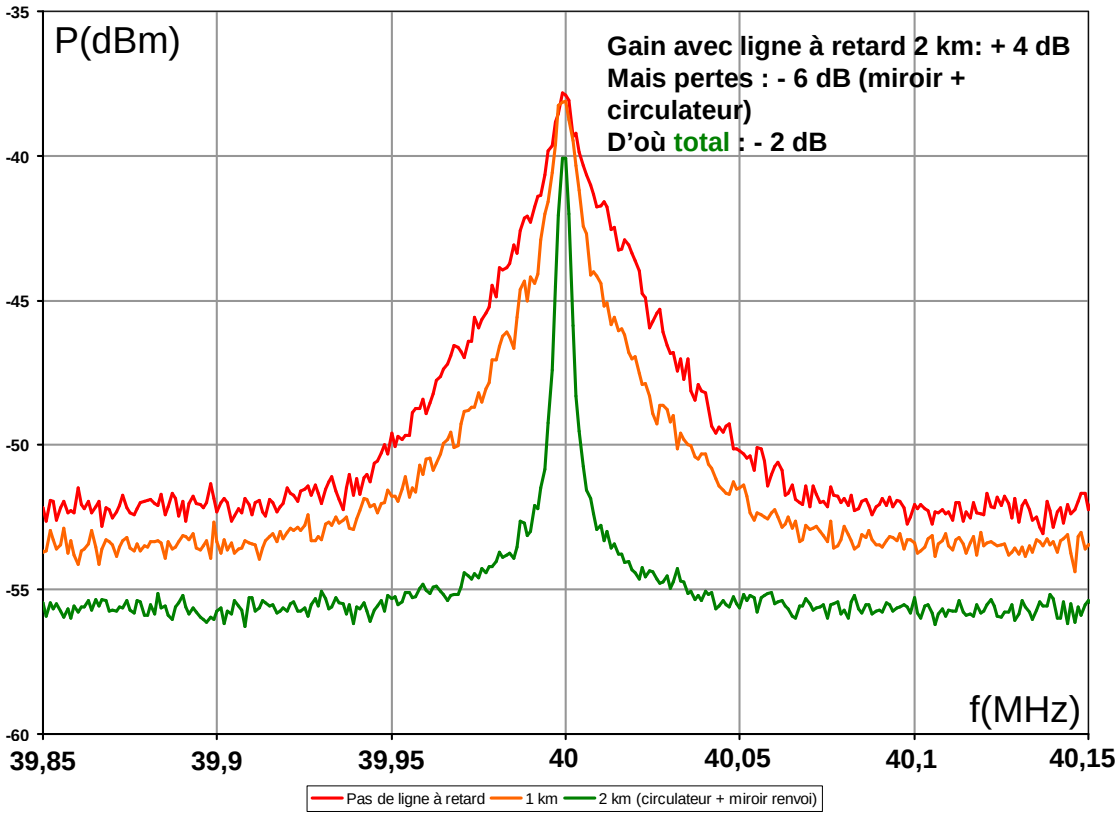
- La vibrométrie laser:
  - Principe et traitement de signal
  - Le hardware
  - Application au diagnostique sismique

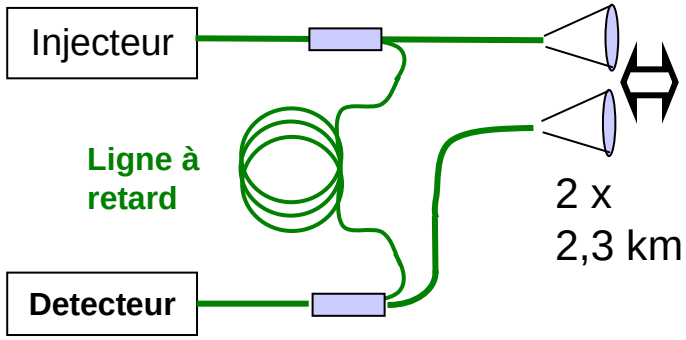
Exemple d'architecture fibrée



Compensation de la largeur de raie laser

élargissement du pic hétérodyne → Ligne à retard



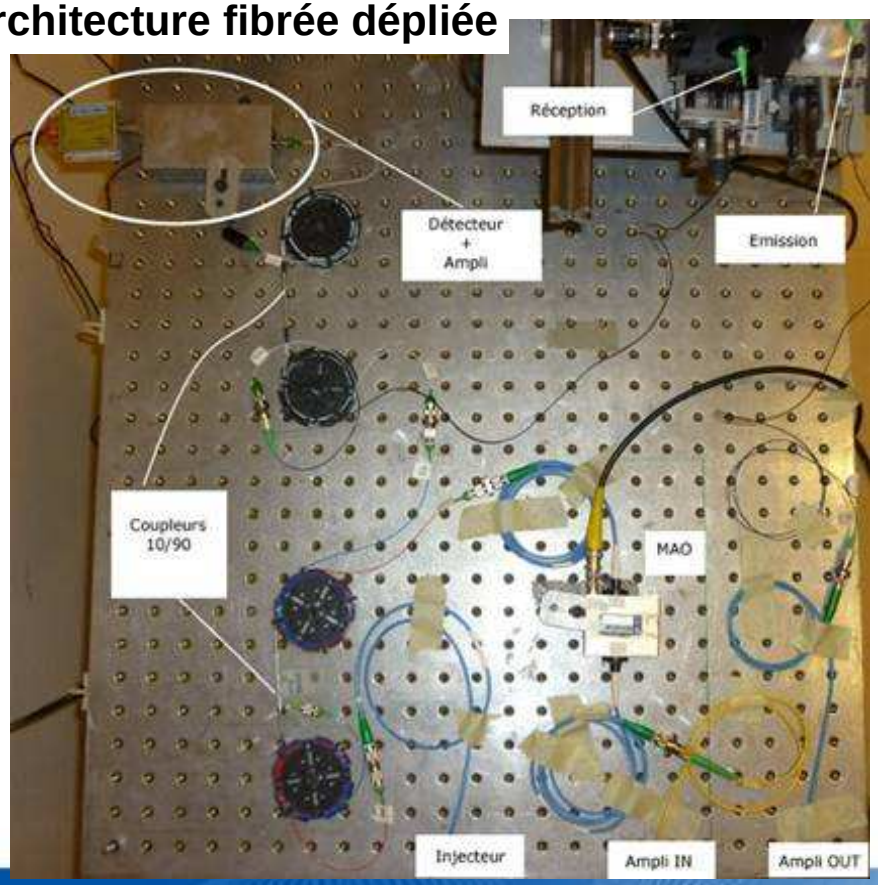


Idéalement, 3km de fibre nécessaires

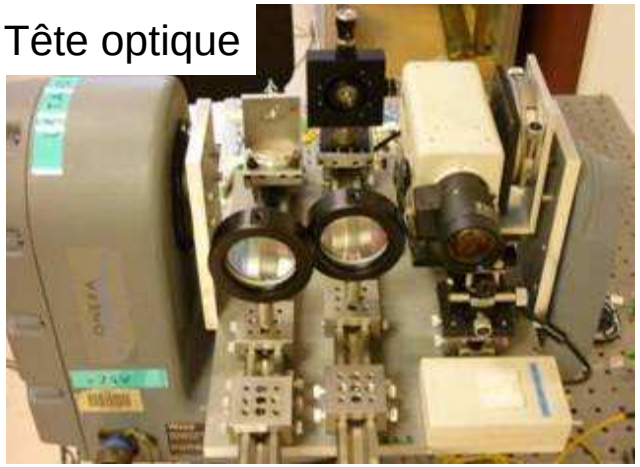
Hardware du vibromètre laser longue portée

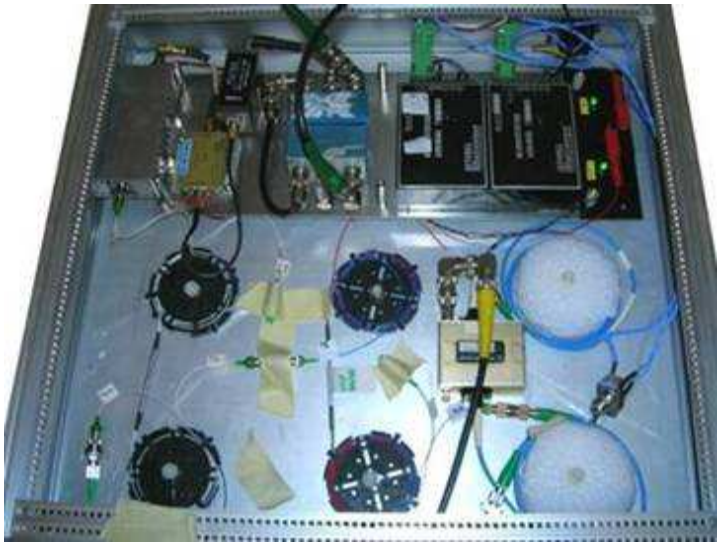
Mesures sur cible à 2,5 km: caractérisation des bruits de mesure

Architecture fibrée dépliée



Tête optique





Rack mélange hétérodyne

ONERA

Plan

- Développements de sources fibrées à grande brillance spectrale
  - l'amplification fibrée: technologie
  - Comment monter en puissance ? Contrôle du seuil Brillouin
  - Application au dial spatial
  - Comment monter en puissance? Combinaison cohérente
  - Application au lidar vent

- Exploitation des non-linéarités des fibres dopées
  - Les sources à 2 µm
  - Génération de supercontinuum
  - Application à la détection de gaz

- La vibrométrie laser:
  - Principe et traitement de signal
  - Le hardware
  - Application au diagnostique sismique

Diagnostic sismique (1/4)

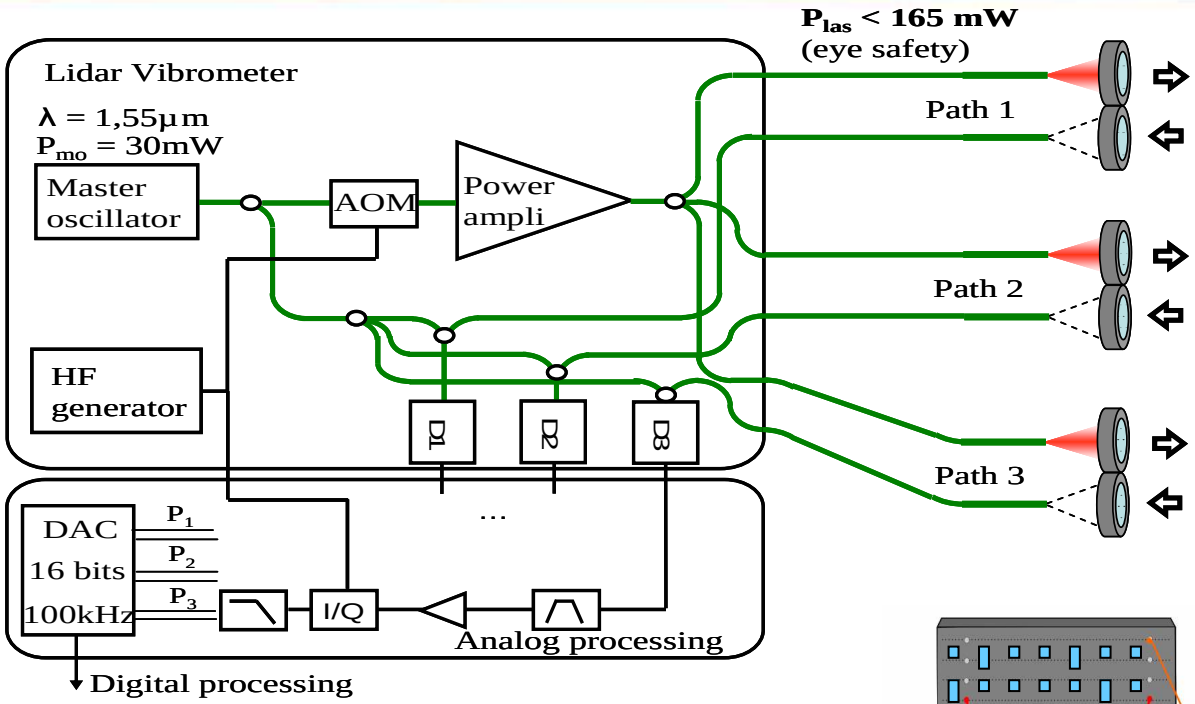
Objectifs:
Utiliser un vibromètre laser pour analyser les modes de vibration de bâtiments

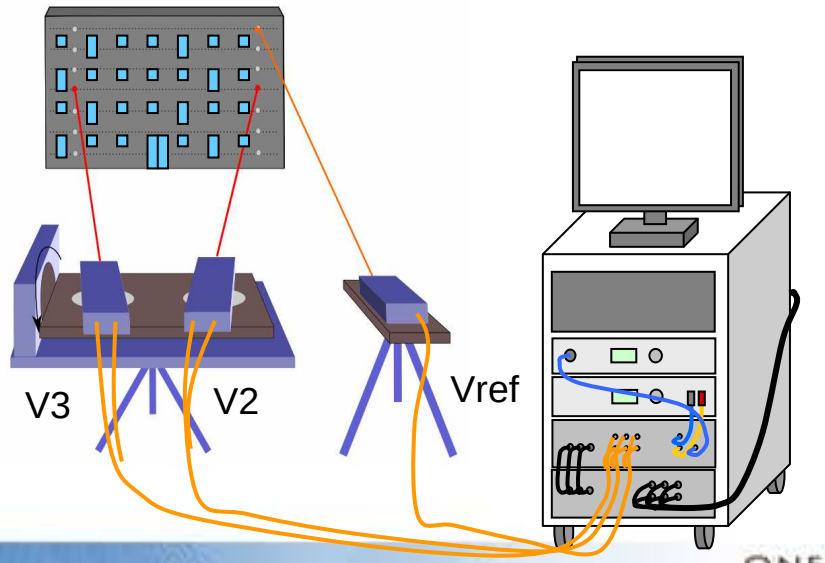
Enjeu: sécurité de personnels

Méthode:
Mesure de la réponse vibratoire du bâtiment excité par le fond sismique avant et après un séisme
→Modification des modes propres
→Diagnostic d'endommagement

Intérêt de la mesure à distance
→Surveillance de plusieurs bâtiments de grande hauteur dans une ville
→Le personnel ne s'approche pas (≠ des sismomètres)

Urbasis: vibromètre à 3 voies





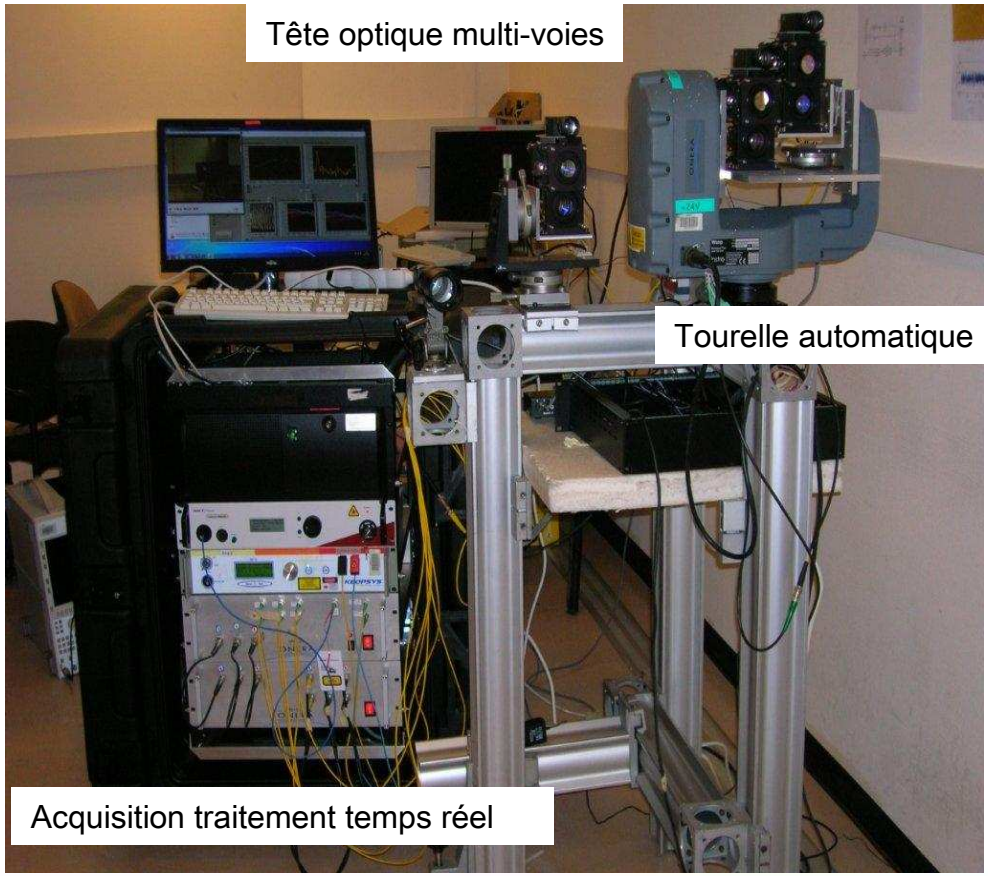
Lidar vibrométrique à 3 voies de mesure

* Vref -> mesure de référence fixe
* V2 et V3 -> mesures pointant différents points de mesure sur l'immeuble

Portée du système 200 à 300m pour rester à sécurité oculaire sur tout le trajet

Vibromètre de terrain Urbasis

- Fonctionnement du Lidar autonome avec groupe électrogène.
- À sécurité oculaire
- Lidar transportable par camionnette (< 3,5 t).

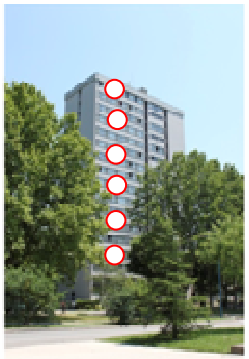


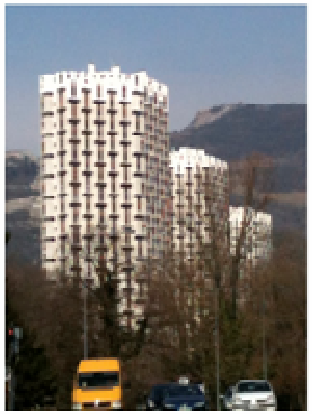
Bande: 0-30 Hz
Vitesse: 1µm/s – 1 mm/s

Campagne sur bâtiments
(Grenoble 2012)

Urbasis: campagne 2012 à Grenoble

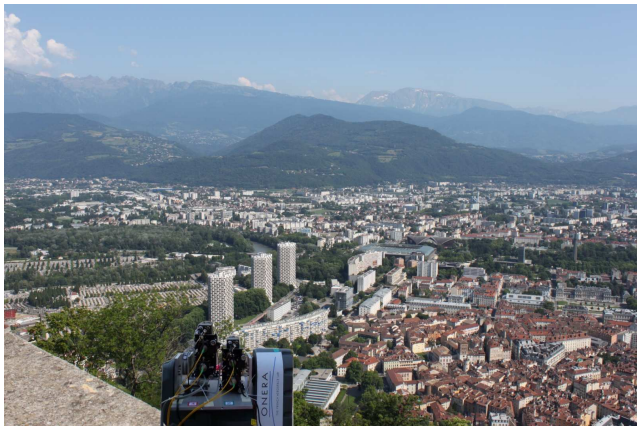
- Acquisition des données Lidar prises à 200m de distance et d'un sismographe de référence placé dans l'immeuble aux différents points de mesure.
- Comparaison des données vibrométriques des deux systèmes et analyse modale.
- Durée d'acquisition de 15 mn pour chaque point de mesure,
- Bande d'analyse 100Hz, résolution 0.1Hz.



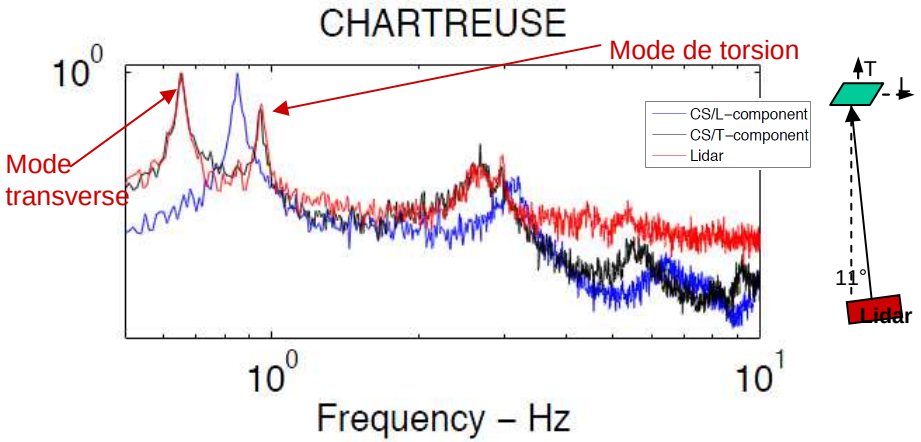


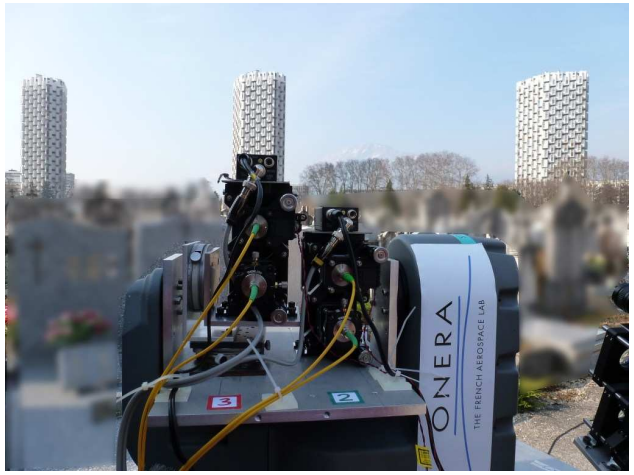
Chartreuse

Ile verte



Exemple de résultats

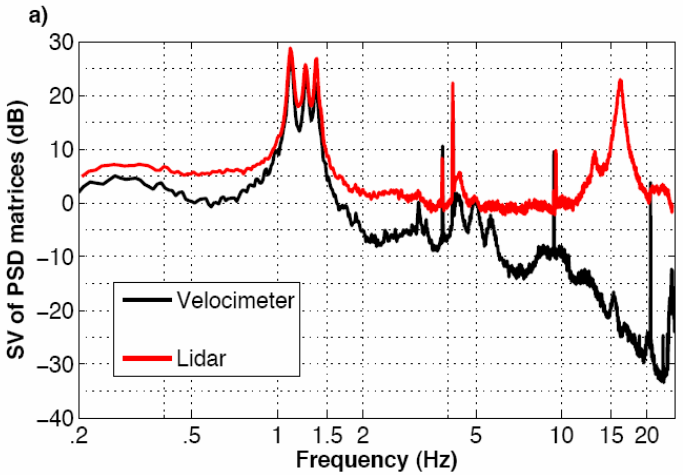


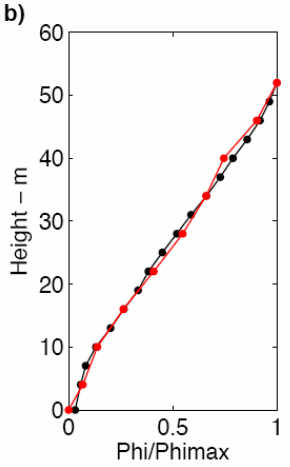


Résultats obtenus sur la tour ARPEJ 2 par “Frequency Domain Decomposition”:

- Décomposition en valeurs singulières
- Amplitude du premier mode reconstruit en fonction de la hauteur

→ Excellent accord lidar-sismomètres





Merci de votre attention

Remerciements à toute l'équipe "sources laser et systèmes lidar"
du DOTA/ONERA

Les résultats des principaux travaux présentés ont été financés par la région Ile de France, l'ANR, l'ESA, l'Union Européene